

## 隔湖重建沉水植物生境对抑制沉积物再悬浮的模拟研究\*

龚 然<sup>1</sup>, 胡 梅<sup>2</sup>, 续衍雪<sup>3,4\*\*</sup>, 徐力刚<sup>5,6,7\*\*</sup>, 蒋名亮<sup>5</sup>

(1: 南京工程学院环境工程学院, 南京 211167)

(2: 江西省生态环境监测中心, 南昌 330037)

(3: 生态环境部环境规划院长江经济带生态环境联合研究中心, 北京 100041)

(4: 清华大学水利系水电工程系, 北京 100084)

(5: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与流域水安全重点实验室, 南京 210008)

(6: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 鄱阳湖湖泊湿地综合研究站, 九江 332899)

(7: 江西省鄱阳湖流域生态水利技术创新中心, 南昌 330029)

**摘 要:** 隔湖自 1990s 以来水生态环境变化迅速, 水生植物几乎消亡, 生态系统由“草型清水”湖演变为“藻型浊水”湖, 其浅水特性在风力作用下常造成底床沉积物的再悬浮现象。泥沙和营养物质频繁重回上覆水体导致水质长期难以改善, 故重建沉水植物生境被认为是恢复隔湖水生态环境的措施之一。本文构建隔湖水环境模型, 模拟和分析水动力及沉积物的再悬浮过程。研究表明, 在常规风力条件下(约 2.2~2.8 m/s), 全湖底床切应力均值( $\bar{\tau}_b$ )约为 0.023 N/m<sup>2</sup>, 全湖几乎不存在沉积物再悬浮现象, 而在强风条件下(如大于 10 m/s),  $\bar{\tau}_b$  可达 0.45 N/m<sup>2</sup>, 全湖绝大部分区域的沉积物均可以发生再悬浮, 南部浅水区域及其东西沿岸为再悬浮发生的高频地区。模型设定了一种沉水植物生境的情景条件进行模拟与预测。研究结果表明, 在易发生再悬浮且适合沉水植物生长的南部区域, 重建覆盖度约为 12% 的沉水植物, 可削减实际条件下  $\bar{\tau}_b$  的 24.4%, 从而分别降低年均和强风时刻全湖固体悬浮物(TSS)浓度的 29.3% 和 25.1%。对一次强风过程的模拟结果表明, 情景条件下  $\bar{\tau}_b$  由实际条件下的 0.45 N/m<sup>2</sup> 下降为 0.34 N/m<sup>2</sup>, 全湖 TSS 均值和最大值比实际条件分别下降了 20.9 和 470 mg/L, 沉水植物生境的存在对全湖 TSS 浓度改善效果显著。

**关键词:** 隔湖; 沉水植物; 沉积物再悬浮; 数学模型; 情景预测

## Modeling the inhibition effect of recreating submerged plants habitat on sediment resuspension in Lake Gehu\*

Gong Ran<sup>1</sup>, Hu Mei<sup>2</sup>, Xu Yanxue<sup>3,4\*\*</sup>, Xu Ligang<sup>5,6,7\*\*</sup> & Jiang Mingliang<sup>5</sup>

(1: College of Environment Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, P.R.China)

(2: Jiangxi Province Ecological Environmental Monitoring Centre, Nanchang 330037, P.R.China)

(3: Chinese Academy of Environmental Planning, United Center for Eco-Environment in Yangtze River Economic Belt, Beijing 100041, P.R.China)

(4: Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P.R.China)

(5: Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(6: Poyang Lake Wetland Research Station, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Jiujiang 332899, P.R.China)

(7: Jiangxi Provincial Technology Innovation Center for Ecological Water Engineering in Poyang Lake Basin, Nanchang 330029, P.R.China)

\* 2023-08-02 收稿; 2023-10-08 收修改稿。

国家自然科学基金项目(U2240224, 42307106)、南京工程学院校级科研基金项目(ZKJ201804)、江西省科技计划项目(20213AAG01012, 20212BBG71002, 20222BCD46002)、江西省水利厅科技项目(202325ZDKT08)和长春市科技发展计划项目(23SH03)联合资助。

\*\* 通信作者; E-mail: lgxu@niglas.ac.cn; xuyx@caep.org.cn。

**Abstract:** Lake Gehu, the second largest shallow lake in Taihu Basin, has undergone rapid water environment changes since the 1990s, with almost total loss of aquatic plants and the changing of ecological type from “macrophyte-clear” to “algae-turbid”. The sediment in this type of lake tends to suspend induced by strong wind, hence, recreation of submerged plants community was recognized to be one of the valid measures for restoring ecological environment in Lake Gehu. In this article, an environmental model was developed, to investigate the hydrodynamic process and sediment resuspension. Results show that, under normal wind condition (2.2–2.8 m/s), the mean value of bed shear stress of the whole lake is about  $0.023 \text{ N/m}^2$ , which cause no sediments resuspension. However, this value can reach over  $0.45 \text{ N/m}^2$  under extreme wind condition ( $>10 \text{ m/s}$ ), and sediment resuspension probably occurs in the most parts of the lake. The southern shallow area and its east and west coast are the high-frequency areas where sediment resuspension occurs. A scenario of reconstructing submerged plant habitat in the area prone to sediment resuspension and suitable for plant growth (covering about 12% of the whole lake) was set for prediction analysis. The results indicate that, under scenario condition, the average annual bed shear stress of the whole lake reduced 24.4% and thus 29.3% and 25.1% for suspended solids concentration both in annual average and at the moment of strong wind, respectively. During a strong wind in simulation, the mean bed shear stress of the whole lake decreased from 0.45 to  $0.34 \text{ N/m}^2$  compared with the actual situation, and the mean and maximum concentrations of suspended solids decreased by 20.9 mg/L and 470 mg/L, respectively. The presence of submerged plant habitat is capable of significant reducing the concentration of total suspended solids in the lake.

**Keywords:** Lake Gehu; submerged plant; sediment resuspension; mathematical modeling; scenario prediction

太湖是太湖流域第二大浅水湖泊,面积约为  $164 \text{ km}^2$ ,平均水深约 1.2 m,具有水产养殖、水上运输、蓄洪灌溉及现代娱乐等多种使用功能,在当地经济建设中占有重要位置。1998 年以前,太湖的沉水植物覆盖度高达 80% 以上,但在 2007 年以后,沉水植物几乎消失,仅有少量点状分布,水生态系统由“草型清水”演化为“藻型浊水”,呈现中—高度富营养特征<sup>[1-2]</sup>。太湖生态环境改变的主要原因被认为是氮、磷的过度输入,引起藻类水华频繁暴发,导致原有水生植物的生境逐渐改变,水生植物大量消亡<sup>[3]</sup>。此外,太湖的浅水特性,使湖流易受风力条件影响,在强风条件下,底床沉积物的再悬浮会导致底部大量营养物质重回上覆水,增加水体营养盐浓度,加速富营养化进程和生态系统类型的改变。

国内外学者对浅水湖泊生态系统的研究表明,湖泊的浅水特性可导致其存在不止一个“可以稳定的”生态系统<sup>[4-5]</sup>。我国学者李文朝早在 1997 年就根据太湖流域浅水湖泊生态系统的演替特征,结合“多稳态理论”的概念和模型,揭示了“草型—清水”和“藻型—浊水”两种湖泊生态系统类型<sup>[6]</sup>。此后,还有比较著名的理论,如“扰动—反弹”理论和“生态系统转换阈值”的概念等<sup>[7]</sup>。水生植物丰富的浅水湖泊通常表现为水体清澈、溶解氧浓度高、藻类密度低、生物多样性高等良好特征。水生植物的存在,提高了底床糙率和泥沙起悬应力,使沉积物不易随水流或风浪的作用而再次悬浮至上覆水。因此,恢复水生植物生境,被认为是修复浅水湖泊生态系统的有力措施<sup>[8-11]</sup>。

从生境恢复的角度,如何重建太湖水生植物生境以及抑制沉积物再悬浮,是多项研究和生态修复所关注的重要问题<sup>[12-15]</sup>。因此,太湖的沉积物再悬浮过程规律,适合重建水生植物群落的区域以及重建后预计的改善效果等均有待深入研究。相比于传统的监测分析方法,数学模型可从整体性和连续性的角度对环境过程进行描述,具有充分的优势。本文尝试通过建立数学模型,采用模拟与预测的方法,研究和探讨以上问题。

## 1 材料和方法

本文基于 EFDC (environmental fluid dynamics codes) 模型框架,构建太湖水环境模型,包括水动力、水质和泥沙等子模块,并进行主要参数校验。EFDC 模型最早由美国弗吉尼亚大学开发<sup>[16]</sup>,现已包含水动力、泥沙输运、水质、沉积物和有毒物质等子模块,并且良好地耦合成为一个整体模型<sup>[17]</sup>。区别于其他模型,EFDC 模型在水动力模块对于类似湿地系统或者海岸带的模拟增加了水力结构、植被阻力和波浪等功能<sup>[18]</sup>;在泥沙输运模块可包含黏性与非黏性两类泥沙的模拟,并可构建多层底床泥沙结构,用于模拟泥沙的输运、推移、沉积和再悬浮,是当前应用广泛、适应性优良的水环境模型。

关于水动力—水质模块、泥沙模块的控制方程详见文献[16-20],风生波流对底床产生应力计算的控制

方程,即 EFDC 模型中 Wind-wave 子模块可参考文献[17,21]。本文主要论述风生沉积物再悬浮的相关问题和重建沉水植物生境的情景模拟。

1.1 模型的构建

1.1.1 研究区域 漏湖(31°29'~31°42'N, 119°44'~119°53'E)水流自西向东缓慢流动,主要入湖河道包括孟津河、夏溪河、湍里河、北干河、中干河等,湖流经太漏运河、漕桥河、殷村港河等出湖河道流往太湖(图1)。漏湖每年4月进入丰水期,10月后逐步进入枯水期,年均入湖水量约为12.4亿 m<sup>3</sup>。

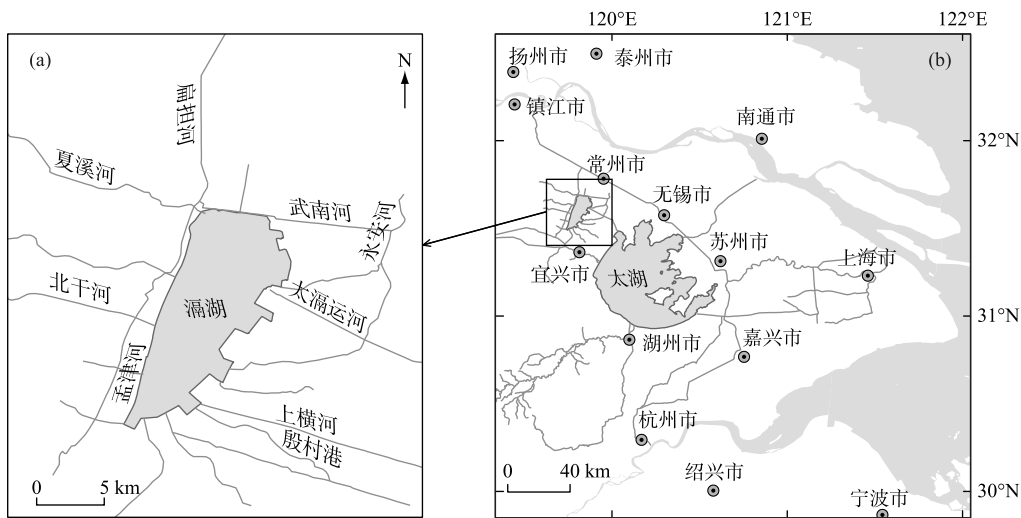


图1 漏湖区域(a)及其在太湖流域的位置(b)  
Fig.1 Lake Gehu (a) and its location in the Taihu Basin (b)

1.1.2 网格划分与边界条件设置 将研究区域划分为561个曲线-正交形式的网格(图2),垂向采用3层结构( $\sigma$ 坐标)。模型校准阶段为2009年12月20日—2011年6月30日,共558 d;验证阶段为2013年5月15日—2014年5月15日,共365 d。计算初始时刻采用实测数据驱动模型,入湖河流边界条件基于计算时段

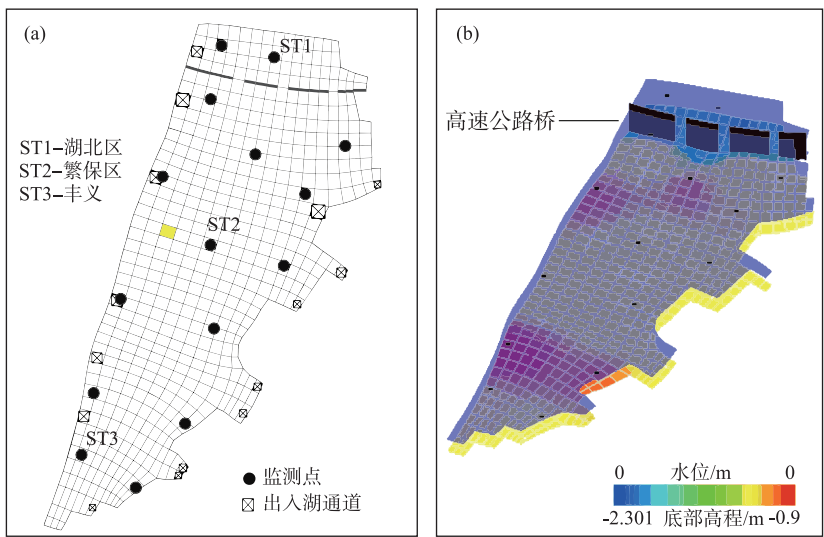


图2 漏湖计算区域网格划分及监测点位置(a)和三维网格结构图(b)  
Fig.2 Mesh generation and the location of sampling sites in Lake Gehu (a) and 3-D mesh structure(b)

实测数据。气象边界条件包括大气压强、温度、风力风向、相对湿度、降雨量和蒸发量等,数据来源于中国气象数据共享网和常州市环境监测站。

## 1.2 模型的校验与参数

本文利用全湖 15 处监测点实测数据进行模型的校验工作,其中,附图 I、II 为具代表性的 ST1(湖北区)、ST2(繁保区)和 ST3(丰义)3 处监测点在两个时间阶段的实测值与模拟值对比图,验证阶段由于漏湖北部清淤改造,对 ST2 和 ST3 进行验证。考虑悬浮沉积物(TSS)浓度未列为常规采样,仅获得 2009 年 7 月 TSS 和透明度的 11 组对比数据作为参考,监测数据均为常规风力状况下采集,无法反映强风时刻的实际情况。本文参考相关文献确定漏湖 TSS 的取值范围<sup>[22-23]</sup>,并结合透明度与藻类生物量的实测数据进行联合校验。经误差统计,水深、温度、透明度和藻类生物量的均方根误差分别为 0.25 m、2.1 °C、0.15 m 和 23.1 mg/L,相对均方根误差分别为 26.6%、7.7%、27.5% 和 29.7%,均小于 35%(表 1),拟合度良好,模型具有较好的可靠度。其中,误差较大的点位为大洪港和繁保区北部,考察现场发现大洪港区域有水生植被,繁保区北部 2015 年仍保留围网养殖区,这些因素模型并未考虑,是导致该区域误差模拟差较大的主要原因。水动力-泥沙模块主要参数见附表 I。

表 1 模型校验的误差统计  
Tab.1 Error statistics of calibration and validation

| 阶段   | 参数           | 对比组数 | 监测均值 | 计算均值 | 均方根误差 | 相对均方根误差 |
|------|--------------|------|------|------|-------|---------|
| 校准阶段 | 水深/m         | 255  | 1.53 | 1.43 | 0.28  | 27.4%   |
|      | 水温/°C        | 270  | 16.5 | 17.2 | 2.58  | 8.8%    |
|      | 透明度/m        | 255  | 0.35 | 0.31 | 0.18  | 31.2%   |
|      | Chl.a/(μg/L) | 269  | 40.4 | 44.2 | 29.0  | 29.2%   |
| 验证阶段 | 水深/m         | 144  | 1.39 | 1.42 | 0.22  | 25.8%   |
|      | 水温/°C        | 144  | 18.8 | 19.0 | 1.69  | 6.5%    |
|      | 透明度/m        | 144  | 0.27 | 0.28 | 0.11  | 23.7%   |
|      | Chl.a/(μg/L) | 144  | 36.7 | 39.7 | 17.2  | 30.1%   |

## 2 结果和讨论

### 2.1 水动力及 TSS 浓度变化分析

采用验证阶段一年周期的模型数据进行水动力及 TSS 浓度变化分析。漏湖水流由西部河道进入,从东部缓缓流出。在分析时段内,ST1、ST2 和 ST3 的平均流速分别为 1.6、7.3 和 7.9 mm/s,北部湖区流速较小;图 3 为常规风力条件(约 2.2~2.8 m/s)下和强风条件(大于 10 m/s)下漏湖底床切应力( $\tau_b$ )的空间分布。由图 3 可知,在常规风力条件下,全湖平均切应力( $\bar{\tau}_b$ )约为 0.02 N/m<sup>2</sup>,最大值为 0.09 N/m<sup>2</sup>,平均值低于本文选取的临界起悬应力 0.06 N/m<sup>2</sup>,以及被广泛认定的临界应力范围 0.05~0.5 N/m<sup>2</sup><sup>[21,24-25]</sup>。整个湖区较大的底床切应力出现在西岸入湖河口处,这是风力条件和入湖流共同作用的结果。可定性推断,在常规风力条件下,沉积物再悬浮除河口区或水深较浅的区域可能会零星发生以外,其余区域几乎不会发生;而在风力约为 10 m/s 的强风条件下(图 3b), $\bar{\tau}_b$  均值可达 0.55 N/m<sup>2</sup>,最大值为 0.97 N/m<sup>2</sup>,此时全湖绝大部分区域都会发生沉积物再悬浮,特别是在河口区和水深较浅的区域。

图 4 为校准阶段(图 4a、b)和验证阶段(图 4c、d)漏湖 TSS 浓度及其标准偏差均值的空间分布图。由图 4 可知,校准阶段 TSS 年均浓度较大值出现在西南部沿岸区域,而验证阶段则出现在东南部沿岸区域,其标准偏差的较大值也出现在各阶段的对应区域。两阶段 TSS 分布的差异具有一定随机性,主要是各阶段风力条件的差异所致。若以繁保区为南北分界,南部区域的 TSS 浓度明显要高于北部区域,南部区域的東西沿岸为整个湖泊沉积物发生再悬浮的高频地区。以验证阶段统计,全湖水体年际 TSS 均值为 29.0 mg/L,标准差均值为 20.1 mg/L,强风条件下东岸殷村港北部区域瞬时值可达 679 mg/L。结合图 3 对底床切应力的分析及全湖底高程分布,造成这种空间差异的主要原因是此类区域的浅水特性,其次为湖流和边界等因素。

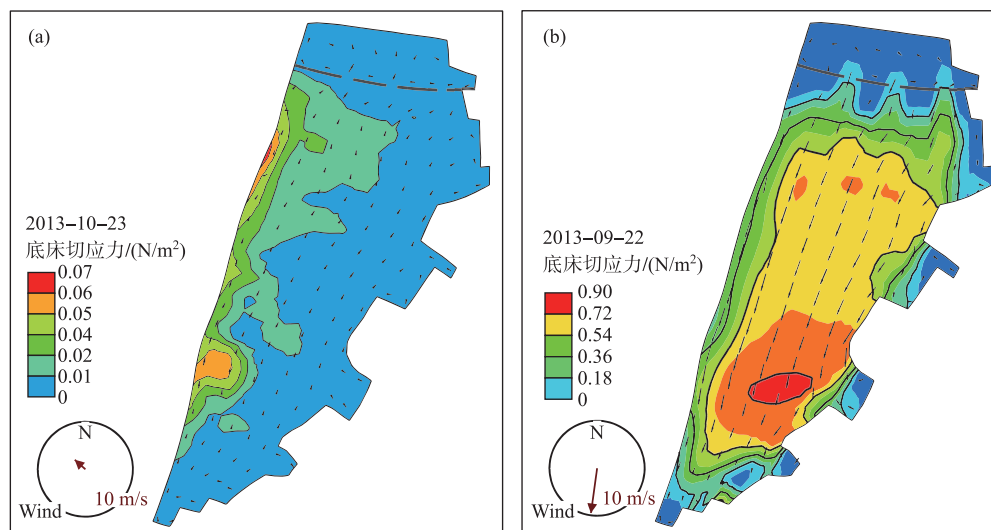


图 3 底床切应力空间分布(流速简化显示):(a)常规风力风向条件;(b)强风条件

Fig.3 Spatial distribution of bed shear stress (simplified flow rate display):

(a) normal wind condition; (b) strong wind condition

例如图 3a 中,TSS 浓度大于 56 mg/L 区域的平均水深约为 1.09 m,低于全湖平均水深 1.27 m,故在同样的风力条件下,该区域表层沉积物将会因更大的底床切应力而率先起悬。此类区域最易出现大范围的再悬浮现象,强风可使巨量的底床沉积物携带大量营养物质重回上覆水体,造成水体严重浑浊和短期内的氮磷浓度快速增加。所以,此类区域应为防范沉积物再悬浮的重点区域。同时,此类区域的浅水特性有利于沉水植物的生长,也是重建水生植物的合理区域。若在此区域范围内尝试恢复沉水植物生境,提高临界起悬应力,减少沉积物再悬浮,对改善水质应具有积极意义。

## 2.2 重建沉水植物生境的情景模拟分析

漏湖历史上常见的沉水植物种类约有 13 种,优势种群也逐年更替<sup>[17]</sup>。近年调查显示,漏湖沉水植物以马来眼子菜、菹草、苦草和金鱼藻为主要品种,呈零星分布,全湖植被覆盖度小于 2%,在湖北区及大洪港区域开展了多项以重建水生植物群落为方法的生态修复工程<sup>[14-15]</sup>。模型拟设定一种重建沉水植物生境的情景条件进行模拟与预测分析。根据图 3b 中强风下全湖应力分布情况和图 4 中年均 TSS 及其标准差分布,结合适宜沉水植物生长条件的综合分析<sup>[12-13]</sup>,情景条件中划定的沉水植物生长的范围(以下简称“重建区域”),如图 5a 所示。考虑到夏、秋季节漏湖面临风浪的概率远高于冬、春季节,情景条件假定以苦草为主的沉水植物群落,其生长主要以夏、秋季节为周期,存在时段贯穿整个年度。模型中设置的特征参数概化为:沉水植物高度(0.8 m)、密度(15 株/m<sup>2</sup>)、茎粗(0.5 cm)和拖曳系数(0.5)。情景条件模拟的时间段及边界条件与模型验证时段相同。图 5b 为强风时刻情景条件下全湖底床切应力分布图;图 6 为实际条件和情景条件下全湖 TSS 均值变化图;表 3 为实际条件和情景条件下的相关指标统计。

根据模型统计,在情景条件下,全湖年均 TSS 浓度为 20.5 mg/L,较实际条件的 29.0 mg/L 下降了 29.3%;在重建区域,实际条件下的年均 TSS 浓度为 37.3 mg/L,重建沉水植物生境后 TSS 降低为 5.1 mg/L,降幅高达 86.3%;在 2013 年 9 月的一次强风中,实际条件下全湖 TSS 的均值为 83.3 mg/L,重建区域为 81.5 mg/L,而情景条件下,其数值分别为 62.4 和 16.0 mg/L,下降幅度分别为 25.1% 和 80.4%,说明沉水植物对重建区域 TSS 浓度有大幅削减作用,也促使全湖 TSS 浓度大幅降低;重建区域在这次强风中的  $\tau_b$  均值由 0.74 N/m<sup>2</sup> 下降为 0.004 N/m<sup>2</sup>,对应的全湖  $\tau_b$  均值统计由 0.45 N/m<sup>2</sup> 下降为 0.34 N/m<sup>2</sup>。对计算时段内  $\tau_b$  的年均值统计也表明,无论在全湖区域或重建区域,由于沉水植物的存在, $\tau_b$  均不同程度地降低,水体透明度也得到了一定的改善(表 3)。

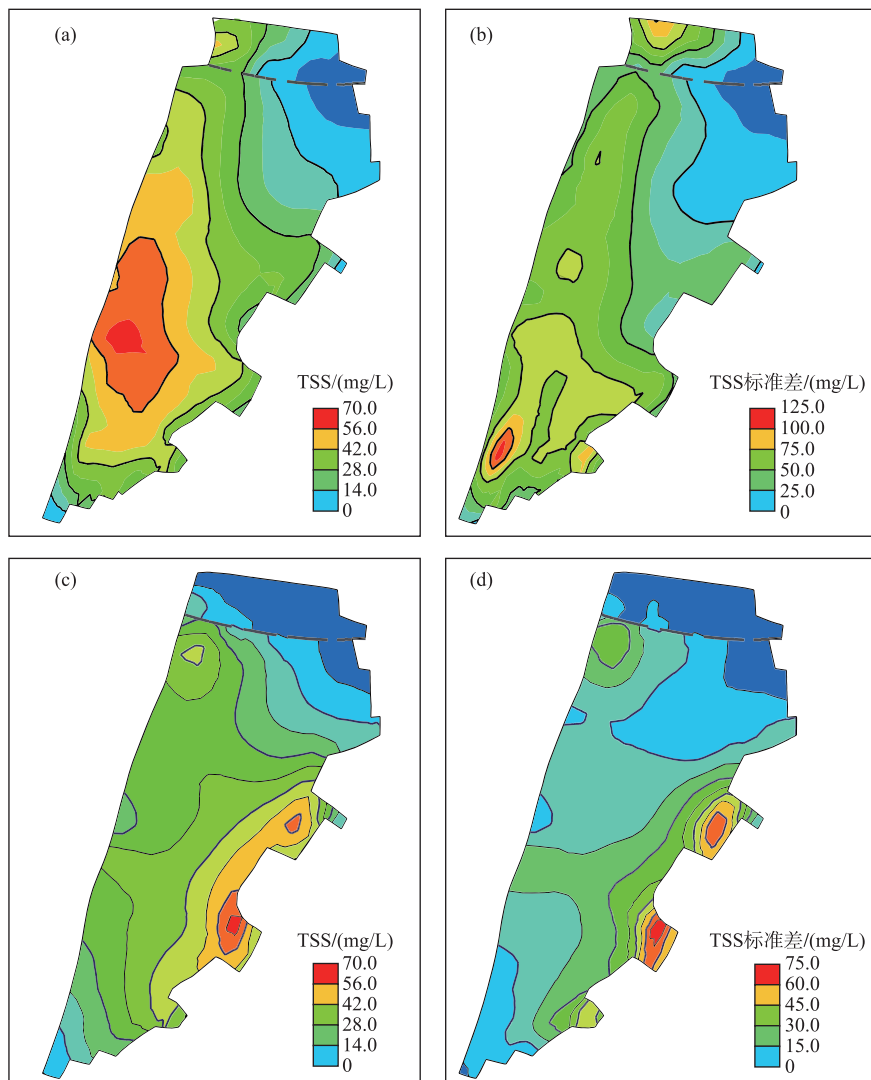


图 4 TSS 浓度及其标准偏差均值的空间分布:校准阶段(a,b);验证阶段(c,d)  
Fig.4 Spatial distribution of mean values for TSS concentration and standard deviation;  
calibration process (a, b) and validation process (c, d)

对比全湖 TSS 均值的变化可知(图 6),情景条件下的模拟值几乎均小于实际条件下的模拟值。沉水植物对 TSS 的影响主要体现在有风环境下,风力越大,越能体现其抑制沉积物再悬浮的积极意义。例如,在上述强风过程中,由于沉水植物有抑制沉积物再悬浮的作用,全湖的 TSS 浓度均值下降到 20.9 mg/L,而靠近殷村港北部在实际条件下的一个浓度高点由 679 mg/L 下降为 209 mg/L,这正是由于  $\tau_b$  的降低导致再悬浮力度的下降。文献[24-25]对临近的太湖底床切应力和沉积物浓度的关系进行了详细的研究,认为在  $\tau_b > 0.02 \text{ N/m}^2$  的情况下,近床区域就可以维持 40~65 mg/L 的 TSS 浓度,从而携带底床氮、磷营养盐进入上覆水体,可见对于浅水型湖泊,降低  $\tau_b$  对抑制 TSS 浓度以及上覆水体营养盐的重要性。

### 3 结语

本文对漏湖在常规风力和强风条件下沉积物的再悬浮情况进行模拟研究,拟定了重建沉水植物生境所

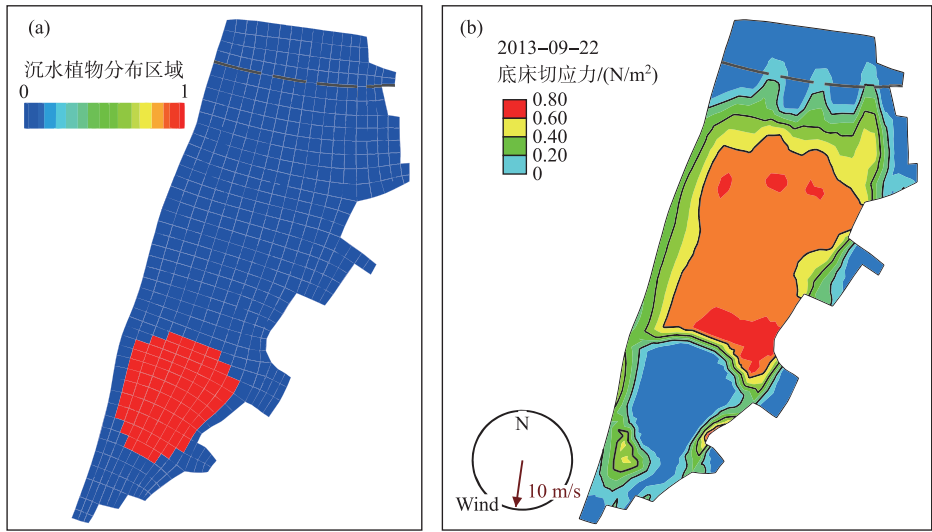


图 5 重建沉水植物情景(a)和情景条件下强风时刻底床切应力分布(b)  
Fig.5 Recreating of submerged plant scenario (a) and spatial distribution of bed shear stress at strong wind moment under scenario condition (b)

表 3 实际条件和情景条件下底床应力和 TSS 统计  
Tab.3 Statistics for bed shear and TSS under real condition and scenario

| 时间                                               | 指标                         | 区域范围 | 实际条件<br>(植被覆盖度<br>小于 2%) | 情景条件<br>(植被覆盖度<br>约为 12%) | 增幅/%  |
|--------------------------------------------------|----------------------------|------|--------------------------|---------------------------|-------|
| 计算时间段均值<br>(2013 年 5 月 15 日—<br>2014 年 5 月 15 日) | TSS/(mg/L)                 | 全湖区域 | 29.0                     | 20.5                      | -29.3 |
|                                                  |                            | 重建区域 | 37.3                     | 5.1                       | -86.3 |
|                                                  | 透明度/m                      | 全湖区域 | 0.31                     | 0.32                      | 3.2   |
|                                                  |                            | 重建区域 | 0.30                     | 0.33                      | 10.0  |
|                                                  | 底床应力均值/(N/m <sup>2</sup> ) | 全湖区域 | 0.023                    | 0.019                     | -17.4 |
|                                                  |                            | 重建区域 | 0.032                    | 0.007                     | -78.1 |
| 强风时刻值<br>(2013 年 9 月 22 日)                       | TSS 均值/(mg/L)              | 全湖区域 | 83.3                     | 62.4                      | -25.1 |
|                                                  |                            | 重建区域 | 81.5                     | 16.0                      | -80.4 |
|                                                  | 透明度/m                      | 全湖区域 | 0.24                     | 0.26                      | 8.3   |
|                                                  |                            | 重建区域 | 0.20                     | 0.30                      | 50.0  |
|                                                  | 底床应力均值/(N/m <sup>2</sup> ) | 全湖区域 | 0.45                     | 0.34                      | -24.4 |
|                                                  |                            | 重建区域 | 0.74                     | 0.004                     | -99.5 |

适合的区域,并进行了情景测试。结论表明,在易发生沉积物再悬浮的高频区域,重建沉水植物生境(12%覆盖度),能有效地降低底床应力,抑制再悬浮的发生,一定程度地提高水体透明度。本研究通过建立水环境模型,应用模拟与预测的分析手段,有的放矢地进行重建水生植物生境的规划,以期为漏湖及类似浅水型湖泊的治理实践提供科学依据。

4 附录

附图 I、II 和附表 I 见电子版(DOI: 10.18307/2024.0521)。

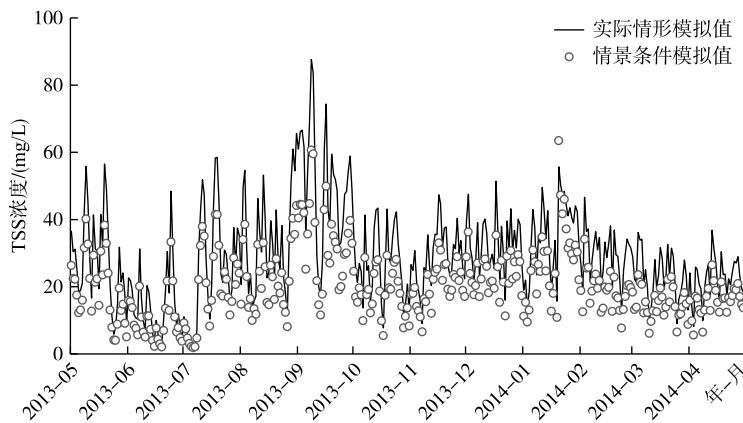
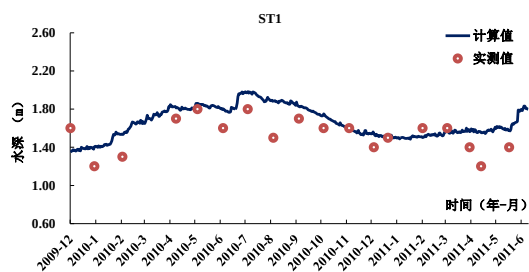


图6 实际条件和情景条件下漏湖 TSS 浓度均值对比

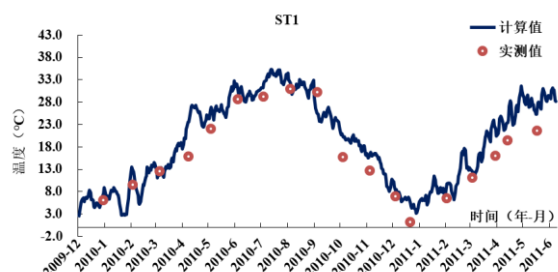
Fig.6 Comparison of TSS concentrations between real condition and scenario in Lake Gehu

## 5 参考文献

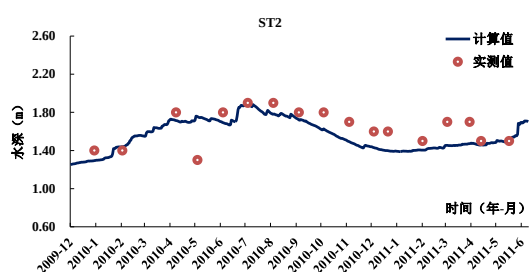
- [ 1 ] Tao H, Pan JZ, Shen YL *et al.* Overview and degradation reasons of submerged macrophytes of Gehu Lake. *Environmental Science and Technology*, 2010, **23**(5): 64-68. [陶花, 潘继征, 沈耀良等. 漏湖沉水植物概况及退化原因分析. 环境科技, 2010, **23**(5): 64-68.]
- [ 2 ] Peng ZR, Chen LJ, Jiang M *et al.* Water quality investigation and eutrophication status evaluation in Gehu Lake. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2007, **16**(3): 252-258. [彭自然, 陈立婧, 江敏等. 漏湖水质调查与富营养状态评价. 上海水产大学学报, 2007, **16**(3): 252-258.]
- [ 3 ] Xu LG, Pan JZ, Jiang JH *et al.* A history evaluation modelling and forecastation of water quality in shallow lake. *Water and Environment Journal*, 2013, **27**(4): 514-523. DOI: 10.1111/j.1747-6593.2012.00370.x.
- [ 4 ] Janssen ABG, Hilt S, Kosten S *et al.* Shifting states, shifting services; Linking regime shifts to changes in ecosystem services of shallow lakes. *Freshwater Biology*, 2020, **66**(1): 1-12.
- [ 5 ] Moi DA, Romero GQ, Jeppesen E *et al.* Regime shifts in a shallow lake over 12 years: Consequences for taxonomic and functional diversities, and ecosystem multifunctionality. *Journal of Animal Ecology*, 2022, **91**(3): 551-565.
- [ 6 ] Li WC. Multiplicity of stable states in shallow lakes and its application. *J Lake Sci*, 1997, **9**(2): 97-104. DOI: 10.18307/1997.0201. [李文朝. 浅水湖泊生态系统的多稳态理论及其应用. 湖泊科学, 1997, **9**(2): 97-104.]
- [ 7 ] Carpenter SR. Regime shifts in lake ecosystems: Pattern and variation. *Excellence in Ecology*, 2003, **15**: i-195.
- [ 8 ] Zhang YF, Liang J, Zeng GM *et al.* How climate change and eutrophication interact with microplastic pollution and sediment resuspension in shallow lakes: A review. *Science of the Total Environment*, 2020, **705**: 135979. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135979.
- [ 9 ] Abell JM, Özkundakci D, Hamilton DP *et al.* Restoring shallow lakes impaired by eutrophication: Approaches, outcomes, and challenges. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022, **52**(7): 1199-1246. DOI: 10.1080/10643389.2020.1854564.
- [ 10 ] Yu JL, Liu ZW, Li KY *et al.* Restoration of shallow lakes in subtropical and tropical China: Response of nutrients and water clarity to bio-manipulation by fish removal and submerged plant transplantation. *Water*, 2016, **8**(10): 438. DOI: 10.3390/w8100438.
- [ 11 ] Gu J, He H, Jin H *et al.* Synergistic negative effects of small-sized benthivorous fish and nitrogen loading on the growth of submerged macrophytes - Relevance for shallow lake restoration. *Science of the Total Environment*, 2018, **610/611**: 1572-1580. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.119.
- [ 12 ] Wu X, Pan J, Ren W *et al.* The effects of water depth on the growth of two submerged macrophytes in an in situ experiment. *Journal of Freshwater Ecology*, 2021, **36**(1): 271-284. DOI: 10.1080/02705060.2021.1969294.
- [ 13 ] Wu XD, Li WC, Pan JZ *et al.* Restoration in northern Lake Gehu, a eutrophic lake in China. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2017, **35**(6): 1417-1431. DOI: 10.1007/s00343-017-6107-4.
- [ 14 ] Wu XD, Pan JZ, Li WC *et al.* Water purification effect in the eco-remediation zone in the east of the Gehu Lake. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, **29**(3): 284-289. [吴晓东, 潘继征, 李文朝等. 漏湖东岸生态修复试验区的水质净化效果. 生态与农村环境学报, 2013, **29**(3): 284-289.]
- [ 15 ] Tao H, Pan JZ, Shen YL *et al.* Effects of substrate character of Lake Gehu on the growth of *Potamogeton crispus* and *Elodea naltalii*. *J Lake Sci*, 2011, **23**(3): 383-388. DOI:10.18307/2011.0310. [陶花, 潘继征, 沈耀良等. 漏湖底质特性对菹草 (*Potamogeton crispus*) 和伊



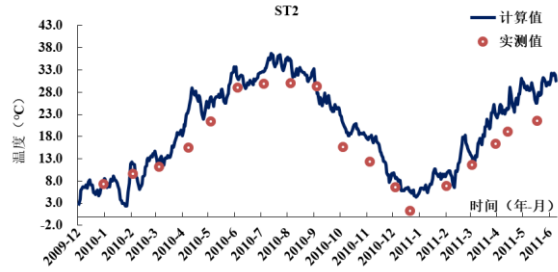
(a)



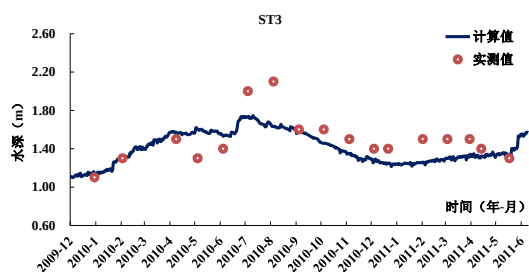
(b)



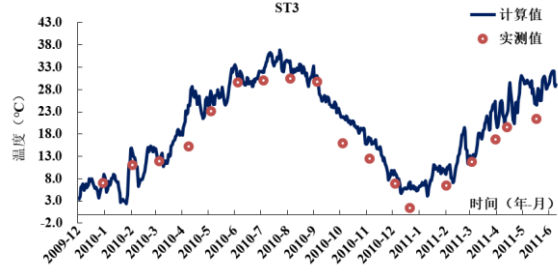
(c)



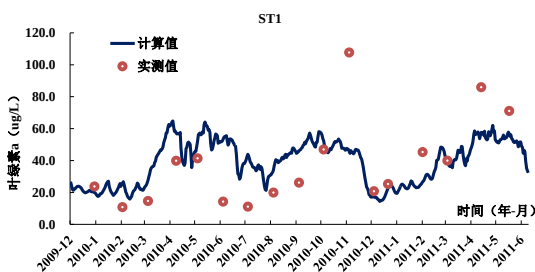
(d)



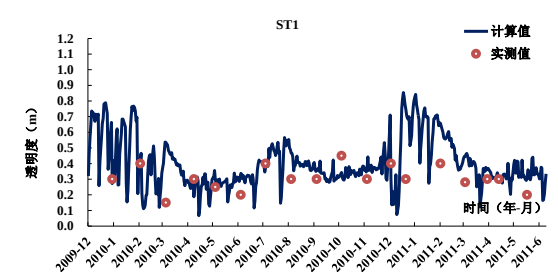
(e)



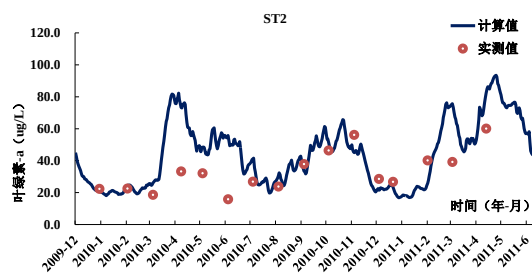
(f)



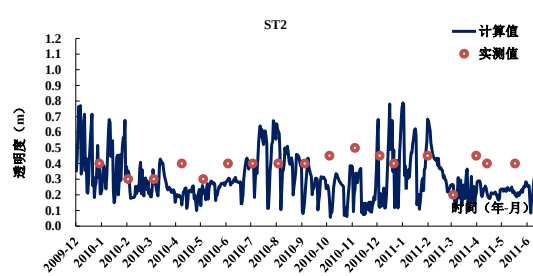
(g)



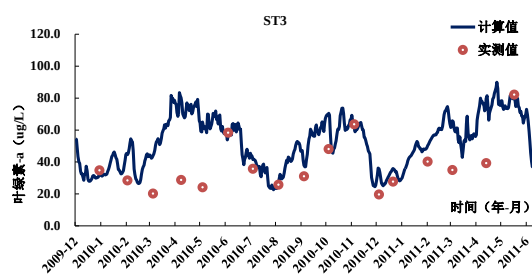
(h)



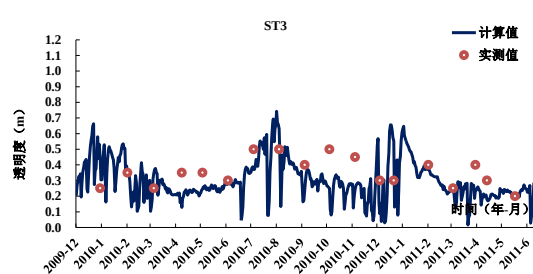
(i)



(j)

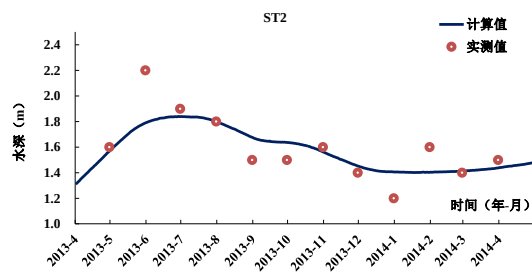


(k)

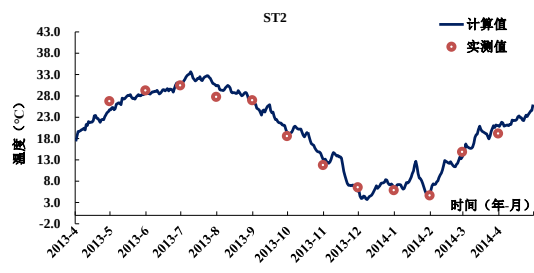


(l)

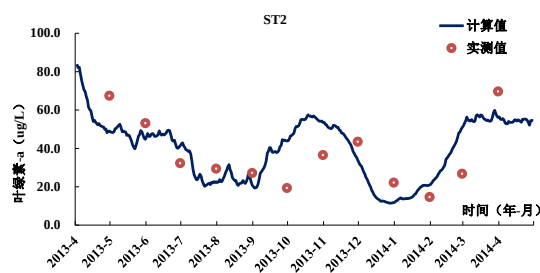
附图I 模型参数校准阶段计算值与实测值的对比  
Attached Fig.I Calibration process: comparison of of calculated and measured values



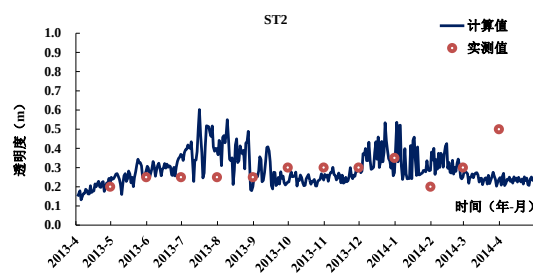
(a)



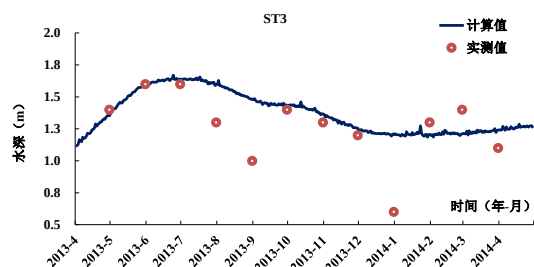
(b)



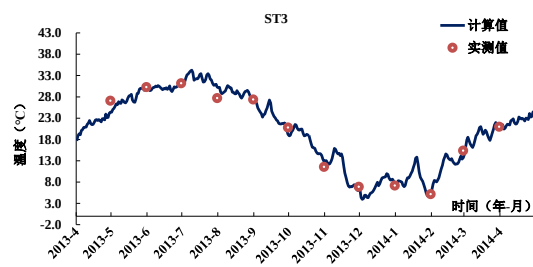
(c)



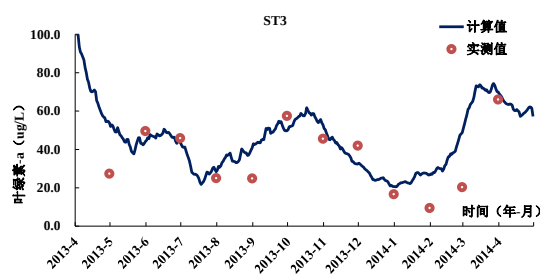
(d)



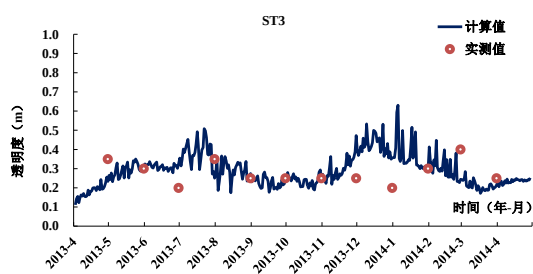
(e)



(f)



(g)



(h)

附图II 模型参数验证阶段计算值与实测值的对比

Attached Fig.II Validation process: comparison of calculated and measured values

附表I 水动力-泥沙模块主要参数选用

Attached Tab.I Main parameters used in hydrodynamic-sediment module

| 参数             | 单位                       | 取值                   |
|----------------|--------------------------|----------------------|
| 干湿临界水深         | m                        | 0.01                 |
| 底床粗糙高度         | m                        | 0.02                 |
| 水体背景光消光系数      | $m^{-1}$                 | 0.45                 |
| 叶绿素消光系数        | $m^{-1}$                 | 0.07                 |
| 沉积物消光系数        | $m^{-1}$                 | 0.1                  |
| 底床温度层厚度        | m                        | 3                    |
| 表层吸收太阳辐射最小份数   | -                        | 0.45                 |
| 底床与底层温度传输系数    | $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ | 0.3                  |
| 底床反射到水柱的太阳辐射系数 | -                        | 0.003                |
| 水平紊动黏性常数       | $m^2/s$                  | 90                   |
| 水平动量扩散系数       | -                        | 0.15                 |
| 底床沉积物面密度       | $kg/m^2$                 | 67.5                 |
| 泥沙沉降等效平均速率     | m/s                      | $1.0 \times 10^{-5}$ |

|              |                       |      |
|--------------|-----------------------|------|
| 泥沙沉积临界应力     | N/m <sup>2</sup>      | 0.05 |
| 泥沙侵蚀（起旋）临界应力 | N/m <sup>2</sup>      | 0.06 |
| 表面泥沙侵蚀参考速率   | g/(m <sup>2</sup> ·s) | 0.01 |