

DOI: 10.11779/CJGE2016S1045

# 土工格室降低湖泊内源释放模拟分析

施 科<sup>1, 2</sup>, 方 磊<sup>1, 2</sup>, 夏禹明<sup>1, 2</sup>

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 湖泊富营养化与内源释放有密切的关系, 降低湖泊因水动力作用引起的底泥再悬浮可大幅度减少湖泊内源污染物的释放。使用数值方法模拟水流在遇到阻碍后的流速变化, 分析比较了不同规格的土工格室对湖泊流速的降低情况。结果表明: 水流经过土工格室后, 湖底的流速有较大幅度下降; 土工格室上方区域流速随格室高度增加而加快, 土工格室后方底层区域流速大小随着土工格室高度的增高而降低, 土工格室能将其后方大部分区域内的流速降低到“个别动”起动流速以下; 增加土工格室长度对流速影响幅度有限。

**关键词:** 内源释放; 土工格室; 水动力学

中图分类号: X14 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S1-0244-04

作者简介: 施 科 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程等方面的科研工作。E-mail: scollar@126.com。

## Simulation of reducing release of internal source in lake by geocell

SHI Ke<sup>1, 2</sup>, FANG Lei<sup>1, 2</sup>, XIA Yu-ming<sup>1, 2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering and Environmental Safety, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Lake eutrophication has a close relationship with the release of internal source. Decreasing the lake sediment resuspension caused by hydrodynamic effect can reduce the release of its endogenous pollutants. A numerical method is proposed to simulate the variation of flow velocity when it meets obstacles, and the decrease of flow velocity is investigated by different sizes of geocell. The results show that the water velocity has more significant decline when it passes the geocell in the lake bottom. The numerical results show the flow velocity above the geocell increases that behind the geocell decreases with the height of geocell. The flow velocity in most areas behind the geocell can be reduced to “little action” or less. There are very limited effects for the flow velocity by increasing the length of geocell.

**Key words:** release of internal source; geocell; hydrodynamics

## 0 引言

随着城市化进程加快, 工农业迅速发展, 氮、磷等营养物质大量进入我国湖泊, 湖泊富营养化日益严重。以太湖为例, 太湖在20世纪80年代初时, 平均水质为II类, 但是当进入21世纪后, 太湖的平均水质降到了IV类, 在某些局部地方的水体水质已经降到了V类甚至劣V类<sup>[1]</sup>。湖泊水体富营养化引起藻类水华灾害频发, 已对局部地区造成了严重的经济损失和沉重的社会灾难, 如2007年5月在太湖发生的严重的藻类水华灾害, 藻类水华灾害的治理问题已经迫在眉睫。

## 1 藻类水华机理

藻类水华是指在一定的气候环境、水文条件、水体营养化条件和生态环境等条件共同作用下形成的藻类过度繁殖和聚集的现象<sup>[2]</sup>。我国主要的水华藻类为蓝藻, 蓝藻(Cyanobacteria)又称蓝细菌, 为单细胞

原核生物, 属于原核生物界<sup>[3]</sup>。水体的富营养化是水华发生的主要原因, 富营养化的指标主要有营养因子、环境因子和生物因子三大类, 其中的营养因子是导致水体富营养化的原因, 在营养因子中, 氮、磷是其中最为关键的因素<sup>[4]</sup>。

## 2 内源释放对湖泊富营养化影响

湖泊中的氮、磷等营养物质的来源主要有外源输入和内源释放两方面。外源输入是指污染物通过入湖河道、大气干湿沉降、地下水入渗以及湖泊地表径流等进入湖泊水体, 内源释放是指污染物通过湖底沉积物的静态和动态释放进入湖泊水体。以太湖为例, 由湖泊沉积钻孔发现, 太湖底泥沉积物中的营养盐含量

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2008CB418100)

收稿日期: 2015-11-30

在若干世纪之前就和现今底泥中营养盐含量相当, 甚至还要更高, 表明太湖地区具备营养盐沉积、富集的条件和引发湖泊营养化的基础<sup>[5]</sup>, 当外界条件成熟, 例如水动力作用对底泥的扰动等, 底泥就会发生再悬浮现象, 底泥孔隙水所含有的营养物质也随之释放到水体中, 于是造成了水体中氮、磷等物质的增加。秦伯强<sup>[6-7]</sup>在野外调查和室内试验的基础上, 认为对于大型浅水湖泊, 湖泊底泥等沉积物再次悬浮的首要决定条件是风浪引起的水动力作用, 并提出了太湖内源释放的估算方法, 在考虑动力扰动的情况下, 计算得到太湖表层沉积物营养盐的年释放量, 总氮 8.1 万吨, 总磷 2.1 万吨, 释放量是外源输入的 2~6 倍。在风平浪静时, 湖泊底部水流流速较小, 其产生的切应力远远小于湖底淤泥的临界起动切应力, 此时底泥不会产生悬浮, 底泥孔隙水中的营养盐主要是弥散到上覆水体中, 对湖泊水体中营养盐含量的影响有限。当风浪来临时, 将引起强烈的水动力作用, 在水土界面产生的切应力将超过底泥起浮的临界切应力, 底泥发生悬浮, 底泥孔隙水中的营养盐也随之扩散到上覆水体中, 导致水体中氮、磷含量激增, 使水体富营养化现象进一步恶化。对于太湖此类大型浅水湖泊, 湖水因风浪引起的水动力作用而产生的湖底切应力可用以下方法计算<sup>[8]</sup>:

$$T_w^b = \rho f \left\{ \pi H_s / \left[ T_s \sinh \left( \frac{2\pi d}{g T_s^2 \tanh \left( \frac{2\pi d}{L_d} \right) / 2\pi} \right) \right]^2 \cos^2 \left( \frac{2\pi t}{T_s} \right) \right\} . \quad (1)$$

式中  $T_w^b$  为波浪产生的湖底切应力;  $\rho$ ,  $t$  分别为湖水密度和时间变量;  $f$  为波摩擦系数, 其值与水底粗糙度和波雷诺数有关, 一般取常数 0.004;  $\pi$  为圆周率;  $T_s$  为有效波的周期;  $H_s$  为有效波高;  $d$  为水深。水动力作用而引起的湖泊底泥内源释放是造成水体中氮磷等营养盐含量增加的重要因素, 因此, 在控制外源性的营养盐向湖泊中流入的同时, 必须要对湖泊的内源性营养盐进行治理, 治理内源性营养盐释放的有效途径是控制底泥的再悬浮。李一平等<sup>[9]</sup>通过太湖底泥起动流速理论模型分别计算出了 3 种不同起动标准下对应的起动流速值和起动切应力值 (“个别动” 为 37.9 cm/s, 0.428 N/m<sup>2</sup>; “少量动” 为 46.7 cm/s, 0.636 N/m<sup>2</sup>; “普遍动” 为 59.8 cm/s, 1.042 N/m<sup>2</sup>), 并通过实验验证了这一结果的正确性。

### 3 土工格室控制底泥再悬浮

土工格室是指由高强度的 HDPE 或 PP 共聚料宽

带, 经过强力焊接或者铆接而形成的三维结构, 大多数具有类似于蜂窝状或者网格状的结构。土工格室具有耐磨损, 化学性能稳定、耐光氧老化、耐酸碱, 伸缩自如, 运输体积小, 联接方便, 施工速度快等特点。在湖底铺设土工格室, 土工格室将有效阻隔水流, 增大水流的运动阻力, 消减水流能量, 减弱湖水对底泥的扰动程度, 减少底泥再悬浮, 从而减少湖泊内源污染的释放。

### 4 土工格室降低内源释放的数值模拟

本文采用 Fluent 软件数值模拟软件, 重点研究土工格室的影响区域内的水流流动状态, 建模和计算时仅进行局部范围内的水流流动情况模拟。

#### 4.1 控制方程

##### (1) 质量守恒方程

任何流体的流动问题都必须满足质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 , \quad (2)$$

引入矢量符号  $\text{div}(\bar{a})$ , 将式 (2) 改写成:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u}) = 0 , \quad (3)$$

式中,  $\rho$  为密度,  $t$  为时间,  $\bar{u}$  为速度矢量,  $u$ 、 $v$  和  $w$  为速度矢量  $\bar{u}$  在直角坐标系下  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向的分量。

##### (2) 动量守恒方程

水流属于牛顿流体, 对于牛顿流体, 流体的变形率与黏性应力  $\tau$  成比例, 所以动量守恒方程可以写成

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_i . \quad (4)$$

式中  $u_i$  表示直角坐标系中  $x_i$  方向的速度分量 ( $i=1, 2, 3$ );  $\nu$  为流体运动黏性系数;  $S_i$  为直角坐标系中  $x_i$  方向上的源项。

##### (3) 能量守恒方程

能量守恒方程尽管是流体的流动还有热量交换等问题的基本控制方程之一, 但是水流一般当作不可压缩的流体, 且在本文中其流动系统的热交换量可以忽略, 因此本次数值模拟只考虑质量守恒方程和动量守恒方程。

#### 4.2 数值计算方法及边界条件

入流边界为  $\Gamma_0$ , 则给定流量随时间的变化值为

$$q(x, y, z, t)|_{\Gamma_0} = q(t) . \quad (5)$$

湖泊的底面和土工格室的各个表面均设定为固壁边界条件, 在固壁边界处采用自由滑移边界条件, 即与闭边界垂直方向的流速为 0, 即

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial n} = 0 \quad (n \text{ 为岸边法线方向}) . \quad (6)$$

其它方向为自由出口边界条件, 对于出流边界

$\Gamma_1$ :

$$\begin{cases} h(x, y, z, t) \Big|_{\Gamma_1} = h(t) \\ \frac{\partial u}{\partial s} = \frac{\partial v}{\partial s} = \frac{\partial w}{\partial s} = \frac{\partial h}{\partial s} = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

其中  $s$  为流线方向。

#### 4.3 模型尺寸及网格划分

本次建立的计算模型是长宽高尺寸分别为 600, 400, 100 cm 的类水槽模型, 分析不同土工格室设计形式对水流流速的影响, 并研究土工格室高度、长度对流速的影响情况。

土工格室模型规格如下:

(1) 保持土工格室长度和厚度 200 cm  $\times$  10 cm 不变, 高度分别为 20, 30, 40, 50, 60 cm。

(2) 保持土工格室高度和厚度 40 cm  $\times$  10 cm 不变, 长度分别为 100, 150, 200, 250, 300 cm。

参考湖底泥沙的启动流速, 设定水流在进入类水槽模型区域时初始流速为 0.6 m/s。

由于本次所建立的模型仅作为研究土工格室对水流影响情况的初步模型, 所以模型中对一些非主要的影响因素采取了适当的简化处理。在模型的面网格划分时, 在面上采用四边形的结构化网格单元进行面网格的划分; 进行体网格划分时, 在模型的大部分区域, 即距离土工格室相对较远的区域采用四面体网格单元进行体网格的划分, 在土工格室附近的区域分别采用六面体、椎体或者楔形单元进行网格划分。

#### 4.4 模拟结果分析

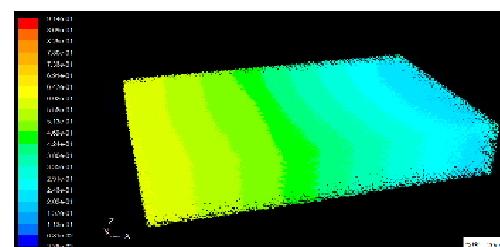
##### (1) 土工格室设计高度对流速的影响

土工格室高度对流速影响的数值模拟结果示于表 1 和图 1。从图 1 中可以看出, 当湖底铺设土工格室之后, 对湖底水流流速的降低起到了一定的作用, 当保持土工格室的长度不变, 仅增加土工格室的高度时, 土工格室上方区域水流加快, 土工格室的高度范围内, 后方 10 cm 区域内流速减少, 但随土工格室的高度增大, 其减小流速的作用趋势放缓。

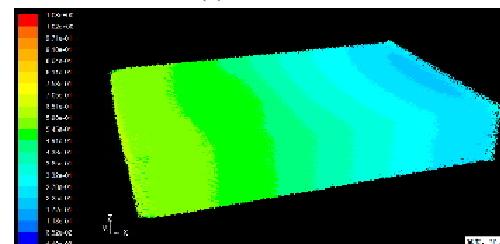
表 1 土工格室周围流速随高度变化情况

Table 1 Variation of flow velocity around geocell with its height

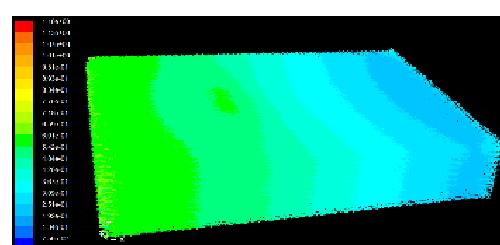
土工格室高度 /cm	土工格室上方最 大流速/(m·s <sup>-1</sup> )	土工格室后方 10 cm 处平均流速/(m·s <sup>-1</sup> )
20	0.914	0.485
30	1.078	0.404
40	1.184	0.332
50	1.667	0.314
60	1.414	0.305



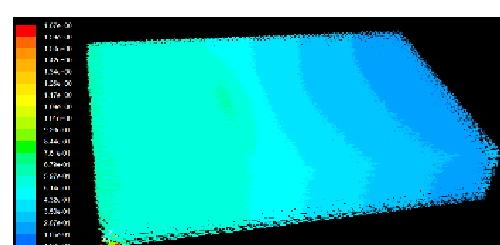
(a)  $H=20$  cm



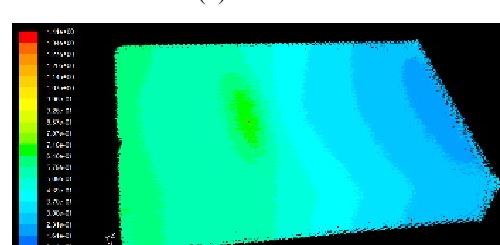
(b)  $H=30$  cm



(c)  $H=40$  cm



(d)  $H=50$  cm



(e)  $H=60$  cm

图 1 不同高度土工格室模型对流速影响

Fig. 1 Effect of different heights of geocell model on velocity

##### (2) 土工格室设计长度对流速的影响

根据数值模拟结果, 统计后方距离土工格室 10 cm 远处的底层水流流速大小的分布情况, 并参考李一平等<sup>[9]</sup>对太湖底泥起动规律的研究成果, 即“个别动”为 37.9 cm/s, “少量动”为 46.7 cm/s, “普遍动”为 59.8 cm/s, 按照以上 3 种起动标准进行划分, 具体统计结果列于表 2。

表 2 各个长度下土工格室后 10 cm 处底层流速分布情况

Table 2 Distribution of flow velocity in 10 cm behind various lengths of geocell

流速范围 /(m·s <sup>-1</sup> )	不同长度流速所占比例/%				
	100 cm	150 cm	200 cm	250 cm	300 cm
>0.598	5	4	5	4	3
0.467~0.598	26	24	21	23	25
0.379~0.467	31	32	33	31	30
<0.379	38	40	41	42	42

从表 2 可以看出, 当初始流速为 0.6 m/s 时, 水流在土工格室阻挡后在后方 10 cm 处流速都有很大程度降低。但在此流速下, 土工格室长度对流速分布的影响并不大, 都能将 95% 左右的水流流速降低到“普遍动”以下, 有 40% 左右区域的流速降低到“个别动”, 随着长度增加, 流速降低效果仅有少量增加。

## 5 结 论

通过数值方法模拟初始流速为 0.6 m/s 的水流在遇到土工格室阻碍后的流速变化情况, 得出结论如下:

(1) 当土工格室的长度和厚度不变, 高度分别为 20, 30, 40, 50, 60 cm 时, 土工格室上方区域流速随格室高度增加而增加, 土工格室后方区域湖水底层流速大小随着土工格室高度的增高而降低, 但降低幅度逐渐减小, 最后趋于平缓。

(2) 当保持土工格室高度和厚度不变, 长度分别为 100, 150, 200, 250, 300 cm 时, 土工格室能将其后方大部分区域内的流速降低到“个别动”起动流速以下, 但长度的增加对流速减小幅度影响有限。

## 参考文献:

- [1] 郭玉华. 太湖流域跨界水生态现状及演化的原因分析[J]. 生态经济, 2009, 2: 158~164. (GUO Yu-hua. Analysis on the current situation and the evolution reason of the trans-region water environment in Taihu basin[J]. Ecological Economy, 2009, 2: 158~164. (in Chinese))
- [2] 孔繁翔, 宋立荣. 蓝藻水华形成过程及其环境特征研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (KONG Fan-xiang, SONG Li-rong. Formation process and environmental characteristics research of Cyanobacterial[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))

Chinese))

- [3] 水利部, 水文局, 长江流域水环境监测中心, 等. 中国内陆水域常见藻类图谱 [M]. 武汉: 长江出版社, 2012. (Ministry of Water Resources, The Hydrographic Office, The Yangtze River Basin Water Environment Monitoring Center, et al. Common waters algae in China[M]. Wuhan: The Yangtze River Press, 2012. (in Chinese))
- [4] 陈 琼. 氮、磷对水华发生的影响[J]. 生物学通报, 2006, 41(5): 12~14. (CHEN Qiong. The influence of nitrogen and phosphorus in bloom[J]. Bulletin of Biology, 2006, 41(5): 12~14. (in Chinese))
- [5] 于 革, 桂 峰. 太湖流域营养盐沉积 200 年的历史模拟研究[J]. 沉积学报, 2006, 24(6): 849~856. (YU Ge, GUI Feng. Historical simulations for 200-year nutrient sedimentations in Taihu catchment[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(6): 849~856. (in Chinese))
- [6] 秦伯强, 朱广伟, 张 璐. 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[J]. 地球科学, 2005, 35: 33~34. (QING Bo-qiang, ZHU Guang-wei, ZHANG Lu. Sediment nutrient release endogenous model and estimation method of large shallow lake—with Taihu as an example[J]. Scientia Sinica (Terra), 2005, 35: 33~34. (in Chinese))
- [7] 秦伯强, 范成新. 大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨[J]. 中国环境科学, 2002, 22(2): 150~153. (QIN Bo-qiang, FAN Cheng-xin. Exploration of conceptual model of nutrient release from inner source in large shallow lake[J]. China Environmental Science, 2002, 22(2): 150~153. (in Chinese))
- [8] SHENG Y P, LICK W. The transport and resuspension of sediments in a shallow lake[J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84: 1809~1826.
- [9] 李一平, 逢 勇, 陈克森, 等. 水动力作用下太湖底泥起动规律研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(6): 770~774. (LI Yi-ping, PANG Yong, CHEN Ke-sen. Study on the starting principles of sediment by water force in Taihu lake[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(6): 770~774. (in Chinese))

(本文责编 明经平)