

## 太湖湖体水环境容量计算\*

范丽丽<sup>1,2</sup>, 沙海飞<sup>3</sup>, 逢 勇<sup>1,2</sup>

(1: 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

(2: 河海大学环境学院, 南京 210098)

(3: 南京水利科学研究所, 南京 210029)

**摘 要:** 针对太湖风生流的特点, 提出考虑风向风速频率修正及污染带控制的水环境容量计算方法, 建立了太湖水量水质数学模型, 并结合水文水质资料对流场和浓度场进行模拟和验证. 在控制单个污染带面积为  $1 \sim 3 \text{ km}^2$ , 污染带总长度为湖岸线长度 10% 的基础上采用该方法进行计算, 计算结果更可靠. 太湖  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的水环境容量为  $132727 \text{ t/a}$ , TN 的水环境容量为  $7700 \text{ t/a}$ .

**关键词:** 水环境容量; 风向; 风速; 太湖

## Water environmental capacity of Lake Taihu

FAN Lili<sup>1,2</sup>, SHA Haifei<sup>3</sup> & PANG Yong<sup>1,2</sup>

(1: *Key Laboratory for Integrated Regulation and Resources Exploitation on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China*)

(2: *College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China*)

(3: *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, P. R. China*)

**Abstract:** Aiming at the wind-driven current in Lake Taihu, a calculation method of combining joint frequency of wind directions, wind speeds and pollution zone control was used to study the capacity of water environment for Lake Taihu. A 2-D unstable-state model of water quantity and quality in Lake Taihu was established. By using hydrological data, the fields of flow and concentrations were numerically simulated, and the simulations were inter-compared. The pollution zone control method which is used to calculate the water environmental capacity was advanced by considering the affect of the speed and direction of wind. Control principia are single pollution control areas between  $1 \text{ km}^2$  and  $3 \text{ km}^2$ , and the total length of pollution zone less than 10% of land line. The  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  capacity of Lake Taihu is  $132727 \text{ t/a}$ , and TN is  $7700 \text{ t/a}$ .

**Keywords:** Water environmental capacity; direction; wind speed; Lake Taihu

近年来,随着太湖流域经济的快速发展和人口的迅猛增长,太湖的水污染和富营养化问题日趋严重. 太湖富营养化的根本原因是流域污染物排放量过大. 为了达到即发展经济又保护环境的目的,合理确定其水环境容量,制定科学的水污染削减方案是控制太湖水污染的关键. 目前有许多学者对湖泊的水环境容量计算方法进行了研究,如刘文祥等<sup>[1]</sup>、葛大兵等<sup>[2]</sup>提出湖泊内水环境功能区达标控制法,王玉敏等提出水环境容量迭加法<sup>[3]</sup>,这些方法在湖泊水环境容量计算方面有了较大改进,但均未考虑风向风速的权重修正以及污染带控制.

对太湖而言,湖流对湖中污染物浓度的分布具有重要影响,而湖流的成因类型主要属于风生流,对太湖水环境容量计算时应考虑风向风速频率修正;其次由于太湖的宽深比较大,污染物主要以岸边排污口形式集中入湖,污染带在湖泊中一旦形成很难扩散,故不能允许全湖污染,岸边污染带的范围成为太湖水环境容量计算的关键. 本文同时考虑了风向风速频率修正及污染带长度控制两个方面,对太湖水环境容量进行了

\* 国家自然科学基金项目(51179053)和河海大学中央高校基本科研业务费项目(B103056)联合资助. 2011-09-06 收稿;2012-03-11 收修改稿. 范丽丽,女,1981年生,博士,讲师;E-mail: fanlili\_hohai@126.com.

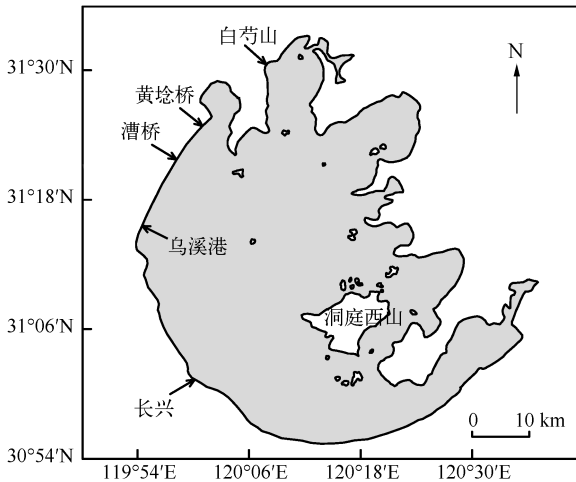


图1 太湖排污口位置示意图

Fig. 1 The location of the generalized outfall stations in Lake Taihu

计算,为太湖流域更加科学合理制定水资源保护规划提供坚实的理论依据,也为太湖水污染防治及总量控制管理奠定基础。

## 1 计算方法及原则

### 1.1 计算方法

考虑入湖河道的水量和污染物排放量的权重,将太湖主要入湖河道概化为白茆山、黄埭桥、漕桥、乌溪港、长兴五个主要控制排污口(图1),建立二维非稳态水量水质数学模型,采用考虑风向风速频率修正、单个污染带面积控制与污染带长度占岸线长度比例控制相结合的方法来计算太湖水环境容量。太湖水环境容量计算公式如下:

$$W = \sum_{j=1}^b (\alpha_j \sum_{i=1}^a W_{ij}) \quad (1)$$

式中, $W$ 为水环境容量( $t/a$ ); $W_{ij}$ 为单个排污口

在某一风向风速下允许纳污量,以污染带面积大小为控制指标; $\alpha_j$ 为各个风向风速频率; $a$ 为排污口个数,以湖泊岸线总长及单个排污口污染带长度大小为控制指标; $b$ 为不同风向风速频率个数。

### 1.2 计算原则

根据国家环境保护部《关于对全国地表水环境容量核定有关问题的进一步说明》,严禁对湖(库)进行整体(湖体)水环境容量计算,湖(库)水环境容量按照入湖支流环境功能达标或者现状重点排污口混合区控制等方法进行计算,大型湖泊岸边污染带范围控制在 $1 \sim 3 \text{ km}^2$ 为宜<sup>[4]</sup>,故控制单个污染带面积为 $2 \text{ km}^2$ ;所有混合区长度总和应小于对应的湖岸线长度总长的10%<sup>[5]</sup>,超过的要按照单位混合区长度的平均分担容量进行削减。

本文水环境容量计算选择高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、总氮(TN)作为水质指标,根据太湖的水功能区划分,太湖的平均水质目标为Ⅲ类,根据《地表水环境质量标准》(GB/T 3838—2002),Ⅲ类水湖库的 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的浓度值 $\leq 6.0 \text{ mg/L}$ ,TN的浓度值为 $\leq 1.0 \text{ mg/L}$ 。因此,在太湖的水环境容量计算中,将污染带定义为排污口附近水域 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 浓度值高于 $6.0 \text{ mg/L}$ 的区域以及TN浓度值高于 $1.0 \text{ mg/L}$ 的区域。

## 2 模型建立及参数选取

### 2.1 基本方程

二维浅水水流方程和对流-扩散方程的守恒形式可表达为<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f(q)}{\partial x} + \frac{\partial g(q)}{\partial y} = b(q) \quad (2)$$

式中, $q = [h, hu, hv]^T$ 为守恒物理量; $f(q) = [hu, (hu^2 + gh^2)/2, huv]^T$ ;  $g(q) = [hv, huv, (hv^2 + gh^2)/2]^T$ ;  $b(q) = [0, gh(S_{0x} - S_x) + hfv + hF_x, gh(S_{0y} - S_y) - hfu + hF_y]^T$ ;  $f(q)$ 为 $x$ 向通量; $g(q)$ 为 $y$ 向通量; $b(q)$ 为源汇项。

### 2.2 定解条件

1) 边界条件流量及水位边界条件: $Q = Q_0, Z = Z_0$ ; 2) 浓度场边界条件:进水边界 $C = C_0$ ,出水边界 $\partial c / \partial n = 0$ ; 3) 初始条件:水位变幅为 $0 \text{ m}$ ,初始流速为 $0 \text{ m/s}$ ,初始浓度取前一个月的平均浓度。

### 2.3 模型率定

2.3.1 水流率定 将太湖划分为7750个三角形网格单元,网格间距为 $220 \sim 500 \text{ m}$ ,水流模型边界条件由2002年5月出入太湖的实测流量资料确定,计算时间步长取为 $1 \text{ s}$ 。率定结果表明,模拟计算所得太湖流场

与实测流态基本一致(图2).模型基本参数率定成果为:曼宁系数(湖底糙率) $n = 0.025$ ;风应力系数 $\gamma_a^2 = 0.0013$ .

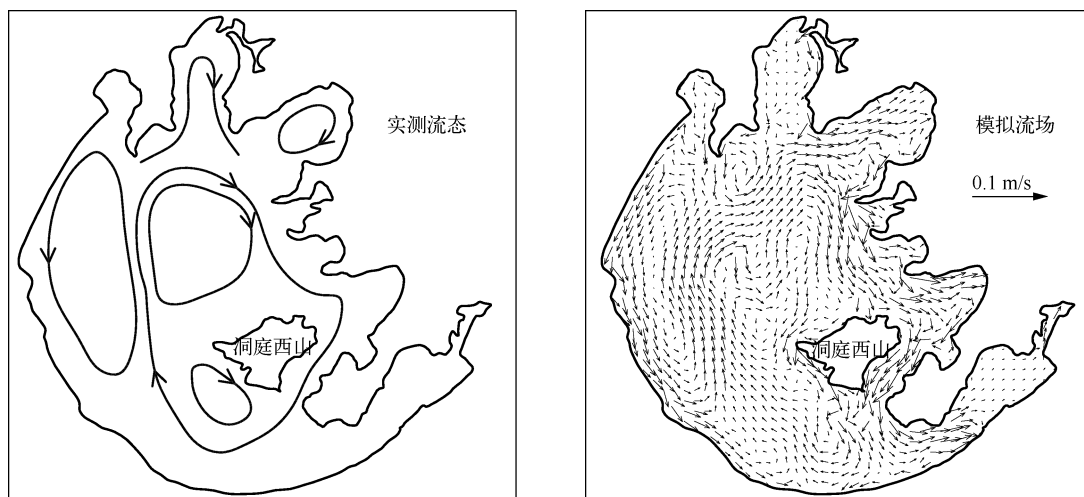


图2 北风作用下太湖流场对比

Fig. 2 Comparison of simulated and measured flow fields of Lake Taihu driven by north wind

2.3.2 水质率定 采用2000年太湖环湖河道实测浓度的资料作为水质模型计算资料,由于太湖不同区域浓度值相差较大,将太湖划分为13个初始浓度值不同的区域,取1999年12月份湖区各实测点的浓度值将其在湖面上进行线性平滑化处理,建立全湖 $COD_{Mn}$ 、TN的浓度场分布.利用2000年湖区水质实测资料,率定得到水质指标模型参数值结果:横向和纵向扩散系数均为 $2.0 \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $COD_{Mn}$ 降解系数为 $0.06 \text{ d}^{-1}$ ; TN降解系数为 $0.011 \text{ d}^{-1}$ .各站点 $COD_{Mn}$ 、TN的率定结果与大浦站(图3)的规律基本一致.经过率定验证可知,所建立的二维模型能较准确地模拟太湖水质.

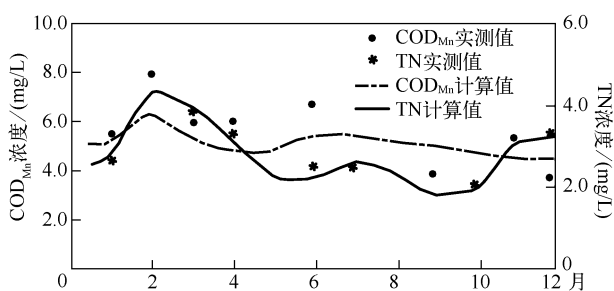


图3 大浦站水质参数对比

Fig. 3 Comparison of calculated and measured water quality concentrations at Dapu Station

### 3 太湖水环境容量计算

#### 3.1 设计水文条件确定

由于太湖主要为风生流,风场对太湖湖流的形成及流态起着重要作用,故在太湖污染带计算中,设计水文条件主要考虑:①太湖流域的风向风速频率<sup>[7-8]</sup>;②太湖不利条件下的水量.分析近几年太湖水文特性和实测资料情况<sup>[9-10]</sup>,2000年属于正常略偏枯的水文年,所以选择2000年的水文水质资料进行模型参数率定计算.

#### 3.2 不同风向下排放量与污染带的关系

运用已建立的二维水量水质模型,进行不同风向下各概化排污口在不同排污量下的浓度场计算,结果表明:不同的风速风向下,污染带面积与形状均发生了变化;在风速风向一定的情况下,污染带的面积随排污量的增加而增大;在排污量大小相同的条件下,污染带的面积随着风速的增大而减小,这是因为风速的增

大带动湖流速度的增大, 污染物扩散输移的速度加快, 所以污染带的面积会减小. 进一步得出不同风速风向下排污量与污染带面积以及污染带长度的关系曲线. 文中仅给出典型风向东南风(平均风速 3.5 m/s)下太湖各排污口附近  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和 TN 浓度等值线图(图 4).

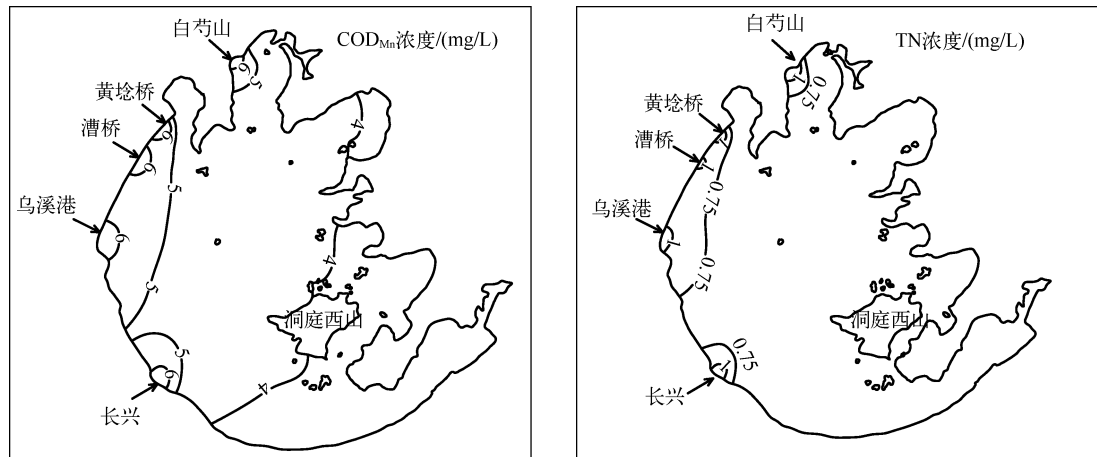


图 4 东南风(平均风速 3.5 m/s)下太湖各排污口附近  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和 TN 浓度等值线

Fig. 4  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  and TN concentration around different outfall stations in Lake Taihu driven by southeast wind

### 3.3 水环境容量计算结果

按太湖的风向频率取权重, 对不同风速、风向下排污量与污染带面积以及污染带长度的关系曲线进行汇总计算, 分别得出考虑风速、风向频率的排污口  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  排污量与污染带面积和长度的关系, 考虑风速、风向频率的排污口 TN 排污量与污染带面积和长度的关系, 四条关系曲线接近线性关系. 根据污染带面积与排污量关系曲线可查出排污口污染带面积在  $2 \text{ km}^2$  时的排污量, 然后将污染带长度与排污量关系曲线中查出的相应排污量对应长度的平均值作为单个排污口的控制长度, 太湖岸线总长为 405 km, 控制混合带总长度小于太湖岸线长度的 10%, 即所有允许排污口的总污染带长不超过 40.5 km 来进行太湖湖体水环境容量计算. 根据公式(1)计算太湖总环境容量, 根据太湖的水质情况将最后的结果换算成  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ , 计算结果见表 1.

表 1 太湖水环境容量

Tab. 1 Water environmental capacities of Lake Taihu

排污口	环境容量/(t/a)		
	$\text{COD}_{\text{Mn}}$	$\text{COD}_{\text{Cr}}$	TN
白茆山	930	3055	205
黄埭桥	2150	7063	380
漕桥	2090	6866	375
乌溪港	2100	6899	370
长兴	2350	7720	210
其他	30784	101125	6160
总太湖湖体	40404	132727	7700

考虑风向风速频率修正及污染带控制的水环境容量计算方法是合理可靠的. 相对湖泊内水环境功能区达标控制法宽松, 考虑了湖体本身的自净能力; 相对水环境容量迭加法严格, 考虑湖泊水循环的特点, 严格控制单个污染带面积和污染带总长度. 满足国家环境保护部《关于对全国地表水环境容量核定有关问题的进一步说明》中关于严禁对湖(库)进行整体(湖体)水环境容量计算的规定, 同时又考虑了风向风速频率修正, 因此更为科学.

## 4 结论与建议

1) 针对太湖风生流的特点, 以  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  及 TN 为污染物控制指标, 提出考虑风向风速频率修正及污染带控制的水环境容量计算方法.

2) 采用二维水流水质模型, 用实测资料进行率定和验证, 从流场和水质计算结果验证可以看出, 模型精度较高.

3) 采用考虑风向风速频率修正及污染带控制的水环境容量计算方法,计算太湖  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的水环境容量为 132727 t/a, TN 的水环境容量为 7700 t/a.

4) 该方法比湖泊内水环境功能区达标控制法宽松,考虑了湖体本身的自净能力,相对水环境容量迭加法严格,更科学,同时满足相关法规的规定.与太湖的污染物入湖量相比,水环境容量尤其不足,故应采取有力措施削减太湖污染物排放量.

## 5 参考文献

- [1] 刘文祥,李喜俊,郭海燕.新疆博斯腾湖水环境容量研究.环境科学研究,1999,12(1):35-38.
- [2] 葛大兵,廖柏寒,程育芝等.岳阳南湖水环境容量研究.湖南农业大学学报:自然科学版,2001,27(4):321-323.
- [3] 王玉敏,周孝德,李家科.湖泊水环境容量迭加计算方法研究.干旱区资源与环境,2005,19(6):108-112.
- [4] 郭森,韩保新,杨静等.纳污海域水环境容量计算与总量分配方法研究——以钦州湾为例.环境科学与技术(增刊),2006,29:19-22.
- [5] 王华,逢勇,丁玲.滨江水体水环境容量计算研究.环境科学学报,2007,27(12):2067-2073.
- [6] 赵棣华.平面二维水流水质有限体积法及黎曼近似解模型.水科学进展,2000,11(4):368-373.
- [7] 李一平.太湖水体透明度影响因子实验及模型研究[学位论文].南京:河海大学,2006:93-94.
- [8] 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.水科学进展,2004,15(6):770-774.
- [9] 逢勇,颜润润,余钟波等.风浪作用下的底泥悬浮沉降及内源释放量研究.环境科学,2008,29(9):2456-2464.
- [10] 范成新,张路,秦伯强等.风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算.中国科学:D辑,2003,33(8):760-768.