

# 太湖梅梁湾三维水动力学模型的研究

## II. 营养盐随三维湖流的扩散规律\*

朱永春 蔡启铭

(中国科学院南京地理与湖泊研究所 南京 210008)

**提要** 建立了太湖梅梁湾三维营养盐浓度扩散模型,研究了在三维湖流的作用下,营养盐随风场的扩散情况。结果表明:(1)当梁溪河和胥江口两个污染源同时存在时,西北风最有利于营养盐浓度的扩散,顺着风向形成了一条西北-东南走向的污染带;而东南风却最不利于营养盐浓度的扩散,使得污染范围仅局限于污染源附近。(2)太湖梅梁湾冬季比夏季更利于污染源浓度的扩散。(3)当风向有利于污染源浓度扩散时,随着风场强度的加大,污染源的扩散范围逐渐增大;反之当风向不利于污染源浓度扩散时,随着风场强度的加大,污染源的扩散范围反而减小。(4)当风向有利于污染源浓度扩散时,营养盐浓度的分布是自上而下递减的;反之当风向不利于污染源浓度扩散时,营养盐浓度的分布是自上而下递增的。

**关键词** 营养盐浓度扩散 风场作用 污染源

**学科分类号** P332

一般湖泊内某一空间点的水质浓度,是各河流河水和区间经流等多种污染源在水动力学条件下共同作用的结果。湖流对营养盐的时空分布起着决定性的作用。黄漪平等(1990)<sup>1)</sup>、顾丁锡等(1988)曾经就营养盐在湖泊中的迁移规律进行了一些研究,但他们所采用的是整层平均的二维湖流模型,没有考虑不同深度营养盐分布规律的差异。本文 I (朱永春等,1997)已经得出结论,不同深度的湖流相差很大甚至完全相反,因而随湖流迁移的营养盐在不同深度的分布规律也将有所不同。基于这一点,在本文 I 已经模拟出太湖梅梁湾三维湖流的基础上,进一步研究营养盐在三维湖流作用下的时空分布规律以及不同风场对其产生的影响。

### 1 浓度模型方程

对于浅水湖泊太湖,其水质分布可按多阶条件下的三维稀释自净方程描述:

$$\text{对于总磷} \quad \frac{\partial P}{\partial t} = E_x \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + E_z \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} - u \frac{\partial P}{\partial x} - v \frac{\partial P}{\partial y} - w \frac{\partial P}{\partial z} - W_p \cdot P + \frac{\alpha P}{H} \quad (1)$$

\* 国家自然科学基金资助项目,39500027号;江苏省社会发展研究基金资助项目,BS95035号。朱永春,女,出生于1966年1月,博士,Fax:0066-025-4714759

1) 黄漪平等,1990. 太湖主要入湖河道污染物总量控制研究. 七五攻关课题

本文 I 发表于《海洋与湖沼》1998 年第 29 卷第 1 期,79—85 页。

收稿日期:1995-10-30,收修改稿日期:1996-07-19

$$\text{对于总氮 } \frac{\partial N}{\partial t} = E_x \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} + E_z \frac{\partial^2 N}{\partial z^2} - u \frac{\partial N}{\partial x} - v \frac{\partial N}{\partial y} - w \frac{\partial N}{\partial z} - W_N \cdot N + \frac{\alpha N}{H} \quad (2)$$

式中,  $P$  为湖水的总磷浓度;  $N$  为湖水的总氮浓度;  $E_x, E_y, E_z$  分别为湖水在  $x, y, z$  方向上的扩散系数;  $W_p, W_N$  分别为湖水中总磷、总氮的沉降系数;  $\alpha P, \alpha N$  分别为单位面积、单位时间内湖底底质与湖水通过水土界面交换的总磷、总氮的数量。

对于边界取法向(即垂直于岸边)的浓度梯度为 0, 即  $\frac{\partial c}{\partial n} = 0$ ; 而起始条件取  $C_{ij} = C_0(i, j)$ 。采用跳点法对三维湖流及浓度模型进行同步积分, 可求出在特定污染源下营养盐的时空分布规律。时间步长为 30s, 对于定常风场, 取连续积分 30h 后的结果为最终结果。

## 2 结果分析

### 2.1 不同风向对营养盐浓度扩散的影响

太湖梅梁湾同时存在着两个主要污染源, 即阊江口和梁溪河。在风场的作用下, 污染物不断地从污染源向四周扩散、迁移。一年四季太湖上空的风向是多变的, 夏季以偏南风为主, 冬季以偏北风为主。本文着重研究随着风向的变化, 营养盐空间分布是如何变化的。

假如只存在梁溪河污染源, 且初始时刻污染源的总磷浓度为  $45\mu\text{g} / \text{L}$ (以总磷为例), 在  $14\text{m/s}$  不同风场的持续作用 30h 后, 营养盐浓度分布如图 1a 所示(取中间层的结果,  $k = 3$ )。从图 1a 可以明显看出, 偏北、偏东的风场有利于该污染源的扩散, 其中东北风对该污染源的扩散最有利, 顺着风向形成一条东北-西南走向的污染带; 而偏南、偏西的风场

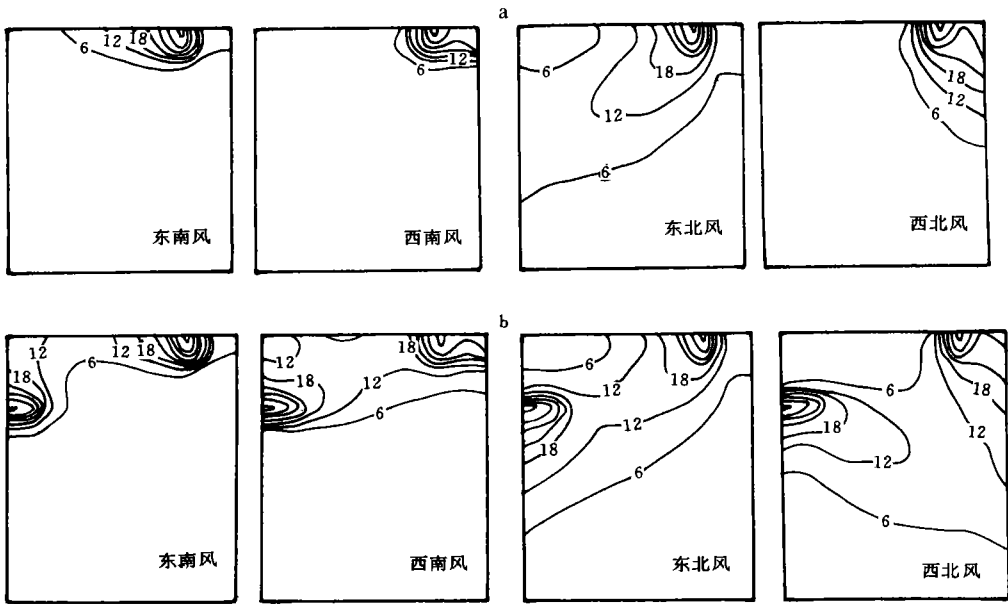


图 1 风向变化对不同污染源营养盐浓度 ( $\mu\text{g} / \text{L}$ ) 扩散的影响

Fig.1 The effect of the variation of wind directions on the diffusion of nutrient concentration( $\mu\text{g} / \text{L}$ )

a. 梁溪河污染源; b. 梅梁湾内两个污染源同时存在

不利于该污染源的扩散,其中西南风对该污染源的扩散最不利,使得污染范围仅局限于污染源附近(持续强西南风作用)。西北风和东南风情况介于两者之间。鉴于太湖地区冬季以偏北风为主,夏季以偏南风为主,显然冬季比夏季更有利于梁溪河污染源的扩散。

通常情况下,梅梁湾的两个污染源是同时存在的。假定初始时刻两个污染源总磷浓度皆为  $45\mu\text{g}/\text{L}$ ,风场持续作用 30h 后的浓度分布如图 1b 所示。可以看出,在西北风的作用下,污染物扩散的范围最大,形成了一条西北-东南走向的污染带。东北风作用下的污染物扩散范围仅次于西北风,西南风介于东北风与东南风之间。而东南风最不利于污染物的扩散,使得污染范围局限于污染源附近。黄漪平等(1990)<sup>1)</sup>曾得出过梅梁湾在西北风作用下其污染状况比其它风况严重的结论。本文结论显然与其相一致。

## 2.2 不同风速对营养盐浓度扩散的影响

除了风向之外,风场强度的变化也同样影响营养盐的浓度扩散。以梁溪河污染源为例,分别取对该污染源扩散最有利和最不利的两种风场,即东北风和西南风,研究营养盐的分布是如何随风场强度变化的。图 2a 给出了在不同强度东北风作用下污染源的扩散情况,可以看出随着风场强度的加强,污染源的扩散范围逐渐增大。图 2b 为对应不同强度西南风的污染源扩散情况,与东北风的情况完全相反,随着风场强度的加强,污染源的扩散范围反而减小。由此可见,对应不同风向,风场强度的变化对营养盐分布的影响是不一样的。当风向有利于污染源扩散时,随着风场强度的加大,污染源的扩散范围是逐渐增大

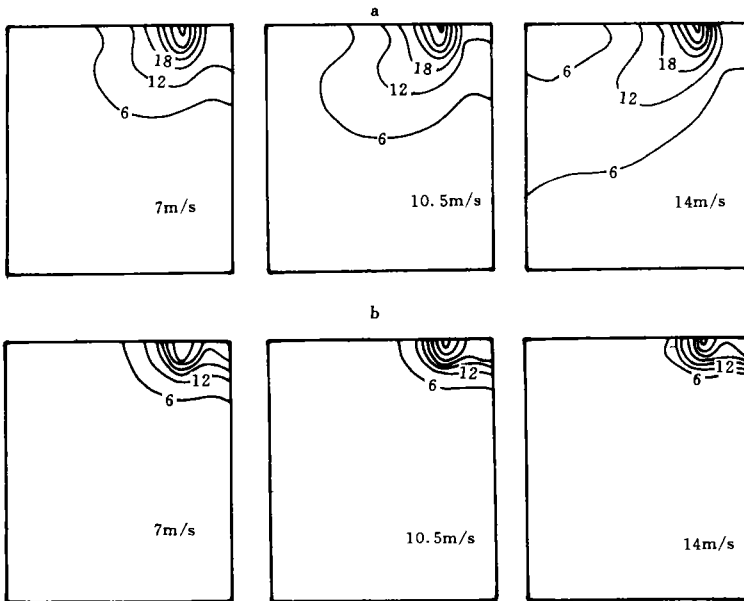


图 2 风速变化对营养盐浓度( $\mu\text{g}/\text{L}$ )扩散的影响

Fig.2 The effect of the variation of wind speeds on the diffusion of nutrient concentration( $\mu\text{g}/\text{L}$ )

a. 东北风; b. 西南风

1) 同第169页脚注1)

的;反之当风向不利于污染源扩散时,随着风场强度的加大,污染源的扩散范围反而减小。

### 2.3 营养盐浓度分布随深度的变化

本文 I 已经模拟出了不同深度的湖流分布(朱永春等,1997),结果发现不同深度的湖流相差很大,表层湖流与底层湖流甚至完全相反。这种上下层不同的湖流分布无疑将影响到营养盐浓度的分布。以梁溪河污染源为例,研究在东北风的持续作用下不同层面的浓度分布情况(见图 3)。显然营养盐的浓度随着深度的增加而递减,但上、下层浓度差异并不很大,且分布趋势一致,都形成一条东北-西南走向的污染带。研究结果表明,东北风最有利于梁溪河污染源的扩散。在东北风的作用下,表层湖流方向与风向一致,自东北流向西南,而底层补偿流则自西南流向东北。显然表层湖流的方向有利于污染源的扩散,底层湖流不利于污染源的扩散。这也就是营养盐浓度底层比表层小的主要原因。然而尽管营养盐浓度随深度的增加而减少,但上、下层浓度场相差较小,远不如上、下层湖流相差那么大。究其原因,一是尽管底层湖流阻碍营养盐的扩散,但其量值小于表层湖流;二是从浓度方程来看,浓度的分布主要由平流项、浓度水平及垂直扩散项决定。平流项主要与湖流有关,但浓度扩散项仅取决于浓度的分布,与湖流无关。尤其是垂直扩散项,其作用是使得上下浓度场趋于一致。此外,还研究了在西南风作用下各层营养盐浓度的分布情况。与东北风正好相反,营养盐的浓度随着深度的增加而增加,但上下各层浓度分布差异较小,且分布趋势一致。

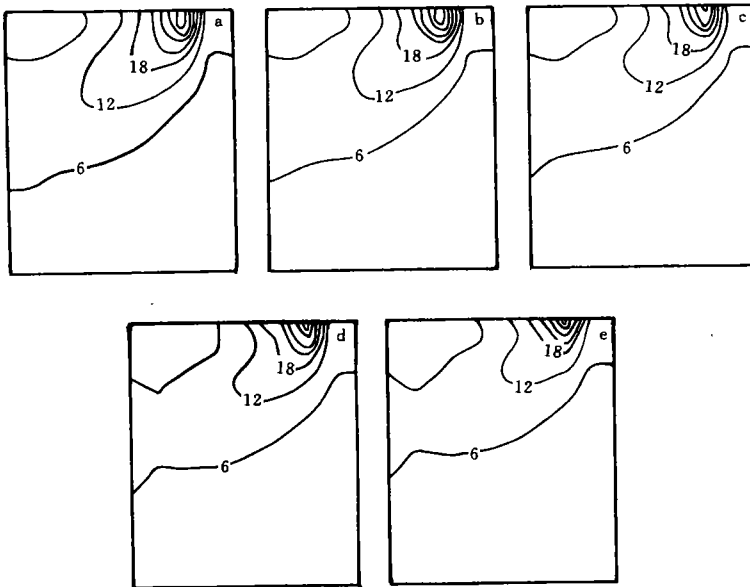


图 3 在 14m / s 东北风的持续作用下,不同深度营养盐的浓度( $\mu\text{g} / \text{L}$ )分布

Fig.3 The distribution of nutrient concentration at various depth under lasting action of 14m / s NE ( $\mu\text{g} / \text{L}$ )

a. 第一层; b. 第二层; c. 第三层; d. 第四层; e. 第五层

综上所述,由于湖流的影响,上下各层的浓度分布存在着一定的差异,这种差异因风向的不同而不同。以梁溪河污染源为例,在东北风的作用下,营养盐的浓度随深度的加深

而递减;而在西南风的作用下,营养盐的浓度随深度的增加而增加。由于浓度扩散项的作用,上下各层浓度分布的差异远小于各层湖流分布的差异。

### 3 小结

在本文 I 已经模拟出太湖梅梁湾三维湖流的基础上,引入了三维营养盐的浓度扩散模型,重点研究了在湖流的作用下,梅梁湾各污染源的浓度扩散情况,以及不同风场对营养盐分布的影响。主要得到以下几点结论。

**3.1** 对梁溪河污染源而言,东北风最有利于营养盐浓度的扩散,污染物基本上顺着风向扩散,形成了一条东北-西南走向的污染带;而西南风则最不利于该污染源浓度的扩散。由于冬季以偏北风为主、夏季以偏南风为主,因此冬季比夏季更利于该污染源浓度的扩散。

**3.2** 当梅梁湾两个主要污染源同时存在时,在西北风的作用下,污染物扩散的范围最大,形成了一条西北-东南走向的污染带;而东南风则最不利于污染源浓度的扩散,使得污染范围仅局限于污染源附近。由于冬季和夏季盛行风向不同,在梅梁湾冬季比夏季更有利于污染源浓度的扩散。

**3.3** 除了风向外,风场强度的变化也直接影响营养盐浓度的分布。当风向有利于污染源浓度扩散时,随着风速的增加,污染源的扩散范围是逐渐增大的;反之当风向不利于污染源扩散时,随着风速的增加,污染源的扩散范围反而减小。

**3.4** 由于上下各层湖流的分布存在着很大的差异,因而也直接影响到不同层面营养盐浓度的分布。当风向有利于污染源浓度扩散时,营养盐浓度的分布是自上而下递减的;当风向不利于污染源浓度扩散时,营养盐浓度的分布是自上而下递增的。但是由于浓度水平及垂直扩散项的作用,上下各层浓度分布的差异远小于上下层湖流分布的差异。

### 参 考 文 献

- 朱永春 蔡启铭, 1997. 太湖梅梁湾三维水动力学模型的研究. 海洋与湖沼, 29(1):79—85  
顾丁锡 舒金华, 1988. 湖水总磷浓度的数学模拟. 海洋与湖沼, 19(5):447—455

## STUDIES ON THREE-DIMENSIONAL HYDRO-DYNAMIC MODEL IN MEILIANG BAY OF TAIHU LAKE

### II. The Diffusion of Nutrient Salt Under the Action of Three-Dimensional Currents

ZHU Yong-chun, CAI Qi-ming

*(Nanjing Institute of Geography and Limnology, the Chinese Academy of Sciences, Nanjing, 210008)*

**Abstract** This three-dimensional diffusion model was developed to mainly study the distribution of nutrient salts under the action of three-dimensional currents in Meiliang Bay of Taihu Lake. Regarding the pollution source in the Liangxi River, the northeast wind is the most (the southwest wind is the least) beneficial to the diffusion of pollutants. In general, two pollution sources exist in Meiliang Bay at the same time, in which case the northwest wind is the most (the southeast wind is the least) beneficial to the diffusion of pollutants, and forms a pollution zone along the direction of wind. As the northern wind prevails in winter and the southern wind in summer, winter is more advantageous to the diffusion of pollutant than summer.

The variation of wind speed also affects the diffusion of pollutant. The extent of pollution increases with the increase of wind speed when the direction of wind is favourable, but decreases with the increases of wind speed when the direction of wind is unfavourable. In addition, the concentration of pollution decreases from the surface to the bottom in the case of the direction of wind being favourable to the diffusion of pollutant, but increases from the surface to the bottom in the case of the direction of wind being unfavourable.

**Key words** lake current pollutant diffusion pollution source

**Subject classification number** P332