

152-158

## 风场对藻类在太湖中迁移影响的动力学研究

朱永春 蔡启铭

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

Q949.1

P343.3

**提要** 在 Webster 等人工作的基础上,以三维湖流为背景,考虑了波浪及藻类自身浮力的影响,建立了一个太湖梅梁湾三维藻类迁移模型,以研究在不同风场作用下藻类在湖泊中的迁移过程.模拟结果表明,不同风场对于藻类在湖泊中的水平及垂直分布影响很大,并且存在着一个临界风速,其范围在 2-3m/s 之间,当风速小于临界风速时,水面可以近似看作水动力光滑,没有波浪产生,在水表面藻类顺着风向迅速向迎风岸边漂移,形成藻类大量堆积.但当风速超过临界风速时,将产生波浪作用,波浪、风扰动及平均环流的共同作用使得藻类在水体中上下混合,分布比较均匀.在太湖水华暴发季节,藻类的运动符合上述模拟结果.

**关键词** 藻类迁移, 水华暴发, 波浪作用, 临界风速

动力学, 风场  
太湖

太湖是我国五大淡水湖之一,具有供水、养殖、航运等多种功能,对太湖地区的社会经济和人民生活有着重要影响.但随着这一地区工农业迅速发展,太湖水体的污染与富营养化问题越来越突出,尤其在夏季蓝藻大量繁殖形成水华,已严重影响这一地区的经济发展和人民的生活.因此,研究藻类在湖泊中的动态迁移过程,对于治理太湖、防止水华暴发具有重要的现实意义.

然而,目前国内尚无人研究藻类在湖泊中迁移的动力学机制,国外有关这方面的研究工作也不多. Webster<sup>[1]</sup>曾建立了一个简单的二维藻类迁移模型并提出一个理论,即由于风场的持续作用使得漂浮藻类(buoyant phytoplankton)在时空分布上产生很大差异,漂浮藻类将明显堆积于迎风岸边. Webster 等<sup>[2]</sup>进一步对模型加以改进,引入了更符合实际的涡旋扩散系数(eddy diffusivity coefficient)参数化方案,从理论上提出存在着一个临界风速,风速大于还是小于临界风速对藻类在湖泊中的迁移影响很大.

Webster 等人藻类迁移模型的特色在于考虑了波浪的影响以及藻类自身的浮力作用,而这两项对于藻类在湖泊中的迁移是至关重要的,这也正是该模型优于同类其它模型的地方.然而 Webster 等人的工作也存在着一些不足之处,他们采用了高度简化的动量方程近似模拟湖流,远远不能代表实际流场,因而决定了他们的工作只能限于理论研究,而很难应用于实际.此外,在 Webster 等人的模型中还忽略了时间变化项、水平扩散项、垂直平流项以及 Y 方向的平流项,而这些因子对藻类的迁移都有一定的影响.本文在 Webster 等人工作的基础上引入时间变化项、水平扩散项、垂直平流项以及 Y 方向平流项,从而完善并发展了藻类迁移模型.并

\* 国家自然科学基金资助项目(编号:39500027).

收稿日期:1996-03-06;收到修改稿日期:1996-07-02.

作者简介:朱永春,女,1966年生,助理研究员.1994年毕业于南京大学大气科学系,博士,主要从事湖泊物理与湖泊生态学研究,已发表有关论文数篇.

以三维湖流为背景,建立了一个具有应用价值的太湖梅梁湾三维藻类迁移模型,较真实、客观地模拟出藻类在湖泊中的迁移过程以及不同风场对其产生的影响,得到了与实测资料相一致的结果。

## 1 藻类迁移模型的建立

本文研究的范围只限于太湖梅梁湾,水平网格为  $20 \times 40$ ,垂直方向共分  $n$  层。叶绿素  $a$  含量  $c(x, y, z, t)$  可以用下述的平流-扩散方程来描述:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} - F \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (K_h \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_h \frac{\partial c}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_v \frac{\partial c}{\partial z}) \quad (1)$$

而在 Webster 的藻类迁移模型中只包含了三项,即  $u \frac{\partial c}{\partial x}, F \frac{\partial c}{\partial z}, \frac{\partial}{\partial z} (K_v \frac{\partial c}{\partial z})$ 。式中  $K_h$  为水平扩散系数,  $K_v$  为垂直扩散系数,  $u, v, w$  为  $x, y, z$  方向的湖流速度,  $F$  为藻类的漂浮速率。

湖流的计算采用的是作者<sup>[3]</sup>所建的太湖梅梁湾三维水动力学模型,基本方程组为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} = f v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (K_h \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_h \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_v \frac{\partial u}{\partial z}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -f u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (K_h \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_h \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_v \frac{\partial v}{\partial z}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0 \quad (5)$$

式中,  $p$  为水压力,  $\rho$  为水密度,  $g$  为重力加速度。

湖表面的边界条件为:

$$\rho K_h (\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}) = (\tau_x, \tau_y) \quad (6)$$

$$(\tau_x, \tau_y) = \rho_a C_D \sqrt{(U^2 + V^2)} (U, V) \quad (7)$$

式中  $\tau_x, \tau_y$  为表面风应力,  $\rho_a (= 1.225 \text{ kg/m}^3)$  为空气密度,  $U, V$  为距湖面 10m 空中的风速,  $C_D (= 0.002)$  为表面拖电系数。

湖底部的边界条件为:

$$\rho K_v (\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}) = (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (8)$$

$$(\tau_{bx}, \tau_{by}) = \rho r_b \sqrt{(u_b^2 + v_b^2)} (u_b, v_b) \quad (9)$$

式中,  $\tau_{bx}, \tau_{by}$  为底部的切应力,  $u_b, v_b$  为底部的水平流速,  $r_b (= 0.0025)$  为底部的拖电系数。

由于湖流方程组为扩散方程组,因此可以采用扩散方程组常用的跳点法求出三维湖流。

藻类的漂浮速率  $F$  为正,表示藻类是上浮的,为负表示藻类是下沉的。本文研究的对象是漂浮藻类,  $F$  可表示为<sup>[1]</sup>:

$$F = F' \cdot u_* \quad (10)$$

$$u_* = 1.2 \times 10^{-3} \cdot \sqrt{(U^2 + V^2)} \quad (11)$$

式中,  $u_*$  为摩擦速度,  $F'$  为一个无量纲常数,根据文献[1]给出的  $F'$  的范围,这里近似取为

0.001 53.

垂直涡旋扩散系数  $K_z$  是随深度变化的,文献[2]给出了其表达式

$$K_z = ku \cdot \left[ z + \frac{z^2}{H} \right] \quad (12)$$

式中,  $k=0.4$ , 为 Von Karman 常数;  $H$  为平均水深, 对于太湖取 2m.

Jenkins<sup>[4]</sup>认为近水表的垂直涡旋扩散系数可因风速的不同出现较大变化, 对于低风速, 可采用(12)式来计算近水表的  $K_z$ , 显然为零; 而对于高风速, 近水表的  $K_z$  就不为零, 可定义为:

$$K_z = ku \cdot \Delta \quad \text{当 } z = 0, \Delta \text{ 时} \quad (13)$$

对于 5m/s 的风场,  $\Delta$  近似取为  $H/10$ <sup>[4]</sup>. 近地表垂直扩散系数的突然增加, 就表示扰动加强, 产生了波浪的作用. 在本模型中风浪的影响体现在水表的垂直扩散系数变化上, Liu 等<sup>[5]</sup>, Cheung 等<sup>[6]</sup>和 Webster 等<sup>[7]</sup>一致认为, 在水表的动量交换过程中存在着一个临界风速, 约为 2—3m/s. 当风速小于临界风速时, 水表可以看作是水力光滑的; 但当风速超过临界风速时, 水表将出现波浪, 波浪的作用直接影响水表的动量交换. 由于缺少太湖的实测资料, 在本模型中将临界风速近似取为 3m/s.

## 2 结果分析

由于所研究的对象为漂浮藻类, 因此, 假设在初始时刻藻类均匀地漂浮在水表面, 即  $c_0(i, j, 1) = 25.0 \mu\text{g/L}$ , 分别模拟在 2m/s 和 5m/s 西风持续作用下, 经过 30h 后的藻类分布情况. 鉴于太湖梅梁湾的形态接近长方形, 为了简单起见, 本文近似用长方形来代替湖湾的形状. 图 1 给出了在 2m/s 西风作用下的各层藻类分布情况, 可以看出在水表层 ( $K=1$ ), 藻类随风场向下风方向迅速漂移, 在迎风岸边出现了明显的聚集现象, 并形成水华, 只有少量的藻类混合进入水中, 但在 5m/s 风场的作用下情况就完全不一样了, 从图 2 中可看出, 藻类由初始时刻浮在水表, 已变为悬浮于水中, 且上下各层分布较均匀, 垂直及水平分布也趋于均一, 东岸的藻类含量略高于西岸, 没有明显的藻类聚集现象发生.

显然 2m/s 的风速小于临界风速 (3m/s), 根据 Liu 等人的理论<sup>[5]</sup>, 水表面为水力光滑, 无波浪出现, 因此除了少量的藻类因垂直环流和垂直扩散的作用进入水中外, 绝大多数藻类依然停留在水表, 随风场向岸边堆积, 而 5m/s 的风速则大于临界风速, 因而在水表便涌现出波浪, 在风浪的搅动下, 藻类悬浮于水中, 经过一段时间的上下混合, 藻类在水中的分布趋于均一, 无堆积现象发生. 该结论与国内外一些湖泊的现场观测资料相一致<sup>[7-9]</sup>, 从而说明结论是可信的. 根据上述结论, 可以认为对于低风速, 要确定藻类在湖泊中的分布相对比较容易, 基本上是随风场而漂移; 对于高风速情况较为复杂, 必须考虑风浪和垂直扰动的影响, 并且只有通过建立物理基础完备的数学模型才能确定藻类在湖泊中的分布.

一般来说, 在夏季太湖的藻类大量繁殖, 形成水华, 严重影响了太湖水质, 因此研究这个时期风场对藻类迁移的影响更有现实意义. 由于资料所限, 取 1991 年 8 月的藻类水平分布资料和 1993 年 7 月的初级生产力垂直分布资料来近似代表藻类的水平及垂直分布, 将其作为初始条件, 研究在东南风 (太湖夏季的盛行风向) 的持续作用下藻类在太湖梅梁湾中的迁移情况. 图 3 给出了在 2m/s 东南风的作用下经过 30h 后的藻类分布情况, 可以看出, 在表水层, 藻类顺着风向自东南向西北方向迅速漂移, 在湖湾的西北部出现大量堆积, 形成明显水华; 而湖湾的东

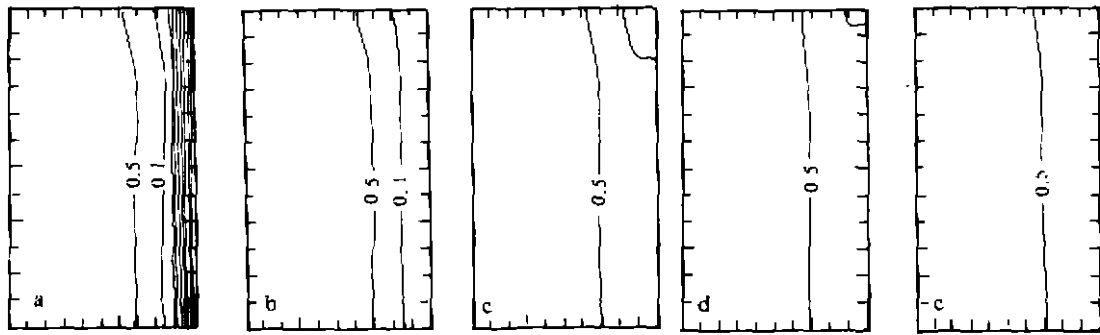


图 1 在 2m/s 西风持续作用 30h 下,太湖梅梁湾各层藻类的分布情况

(假设在初始时刻藻类均匀地漂浮在水表面)

(a)表层,  $K=1$ ; (b)第二层,  $K=2$ ; (c)第三层,  $K=3$ ; (d)第四层,  $K=4$ ; (e)第五层,  $K=5$

Fig. 1 The distribution of algae under 2m/s west wind for 30 hours

The initial condition is that algae float evenly at the water surface

(a)surface; (b)second layer; (c)third layer; (d)fourth layer; (e)bottom layer

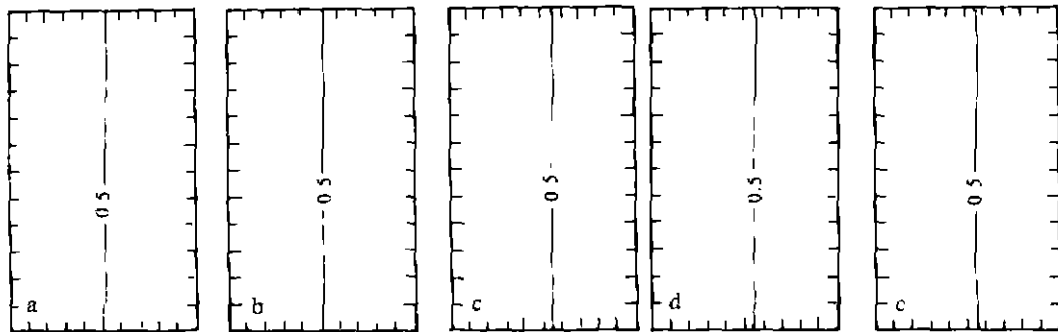


图 2 风速为 5m/s,其它同图 1

Fig. 2 As in Fig. 1 but for 5m/s west wind

南部藻类的含量却很低. 表层以下各层,藻类也向西北部迁移,但没有表层那么明显. 这是由于表层湖流方向与风向一致,有利于藻类向西北部漂移,而底层湖流方向与表层相反,不利于藻类向西北部漂移. 但是表层藻类在西北部聚集,使得其浓度明显高于底层,在浓度扩散项的作用下,必然有部分藻类扩散至底层,造成底层西北部藻类的浓度仍然高于东南部. 可见藻类在湖湾西北部大量堆积形成水华的现象主要发生在水表. 图 4 为 5m/s 东南风作用下藻类的分布情况,可以看出藻类含量由东南向西北缓慢递增,但增加的幅度很小,藻类在湖湾中的分布比较均匀,无明显的聚集现象发生. 其原因同上,不再赘述. 杨清心等人 1990 年在对太湖水华的 9 次调查中发现,当风速较小时,漂浮藻类随东南风向太湖的西北部漂移,在那里形成明显

水华;但当出现风浪时,风浪可抑制藻类的聚集,使得藻类垂直及水平分布趋于均一<sup>[9]</sup>.显然本文的模拟结果与其相一致,从而说明结果是合理的,模型是可信的.

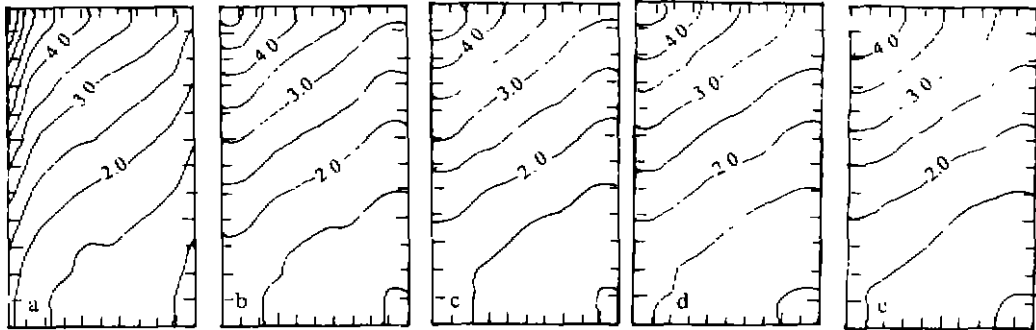


图 3 在 2m/s 东南风持续作用 30h 下,太湖梅梁湾各层藻类的分布情况

(假设初始时刻藻类的分布基本上按照 1991 年夏季梅梁湾的实际情况)

(a)表层,  $K=1$ ; (b)第二层,  $K=2$ ; (c)第三层,  $K=3$ ; (d)第四层,  $K=4$ ; (e)第五层,  $K=5$

Fig. 3 The distribution of algae under 2m/s SE wind for 30 hours. The initial condition is that algae distribute similar to the actual situation of Meiliang Bay in summer, 1991

(a) surface; (b) second layer; (c) third layer; (d) fourth layer; (e) bottom layer

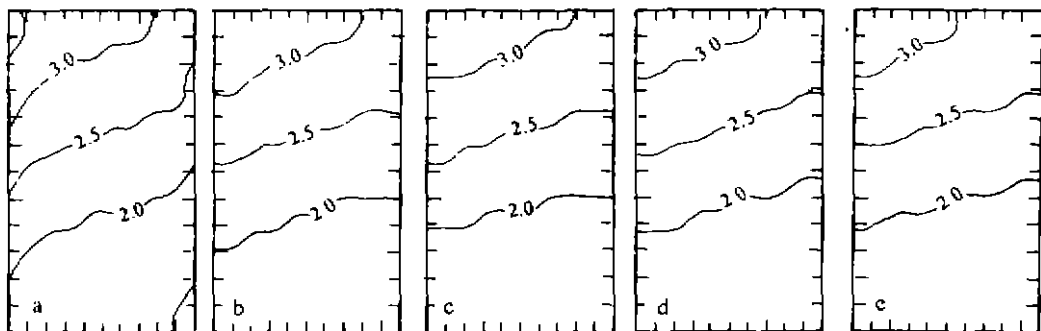


图 4 风速为 5m/s,其它同图 3

Fig. 4 As in Fig. 3 but for 5m/s SE wind

### 3 小结

本文在 Webster 等人工作的基础上,将其所建的二维高度简化藻类迁移模型加以发展,并以真实的三维湖流为背景,建立了一个太湖梅梁湾三维藻类迁移模型,比较客观地模拟了藻类在太湖梅梁湾中的迁移过程,并与太湖的实际观测结果进行了比较,取得了令人满意的结果,从而也验证了模型的可信性.

风场对藻类在湖泊中的迁移影响很大,因而本文重点研究了在不同风场作用下藻类在太湖梅梁湾的迁移情况,结果表明,藻类在湖泊中的迁移主要取决于风速大于还是小于临界风速(本文取 3m/s),这是一个转折点,对应着两种完全不同的藻类迁移过程.当实际风速小于临界风速时,湖面可以近似看作水动力光滑,没有风浪产生,藻类在水表顺着风向不断堆积在迎风岸边,漂浮藻类依然停留在水表,不会因风场的作用而沉入水中,在这种情况下,藻类的分布是比较容易确定的,藻类基本上是顺着风向漂移的;当风速大于临界风速时,将产生波浪的作用,波浪、风扰动及平均环流的共同作用使得藻类上下混合沉入水中,藻类在水中的分布趋于均匀,无堆积现象发生,在这种情况下,要确定藻类在湖泊中的分布要复杂得多,必须考虑风浪和垂直扰动的影响,并且只有通过建立物理基础完备的数学模型才能确定藻类在湖泊中的分布.可以说风速大于还是小于临界风速对于藻类的水平及垂直分布有着重要的影响.

除了光、温、营养盐这些重要因素外,风场的作用对于太湖水华的形成也有着一定的影响.在太湖水华暴发季节,当盛行的东南风小于临界风速时,藻类顺着风向漂移,在湖湾的西北部大量聚集,从而形成明显水华;而当风速超过临界风速时,风浪的搅动作用使得藻类在湖中的水平及垂直分布趋于均匀,不再出现藻类聚积现象,从而抑制了水华的形成.该结论得到了太湖现场观测资料的验证,由此可见,水华的形成与风速大小有着一定的关系,风速过大或过小都不利于水华的形成,究竟多大的风速最有利于太湖水华的形成?还值得作更进一步深入的研究.

本文的数值模拟结果表明,风浪的作用显然不利于藻类的富集,然而太湖的一些现场考察发现,风浪的搅动作用对藻类的生长却非常有利,在一阵风浪过后,藻类的生长速度明显增加,如果片刻之后刮起阵阵轻风,则很容易引起藻类在迎风岸边大量聚集,形成明显水华.可见风浪作用对水华形成的影响不仅仅是物理过程还包含着复杂的生物化学过程,在今后的工作中将对此作更深入、全面的研究.

## 参 考 文 献

- 1 Webster I T. Effect of wind on the distribution of phytoplankton cells in lakes. *Limnol Oceanogr.* 1990, **35**:989-1001
- 2 Webster I T, P A Hutchinson. Effect of wind on the distribution of phytoplankton cells in Lakes revisited. *Limnol Oceanogr.* 1994, **39**:365-373
- 3 朱永春,蔡启铭.太湖梅梁湾三维水动力学模型研究.见:蔡启铭主编.太湖环境和生态学研究.北京:科学出版社,1996
- 4 Jenkins A D. Wind and wave induced currents in a rotating sea with depth-varying eddy viscosity. *J Phys Oceanogr.* 1987, **17**:938-951
- 5 Liu W T, K B Katsaros, J A Businger. Bulk parameterization of air-sea exchanges of heat and water-vapor including the molecular constraints at the interface. *J Atmos Sci.* 1978, **36**:1722-1735
- 6 Cheung T K, R L Street. The turbulent layer in water at an air-water interface. *J Fluid Mech.* 1988, **194**:153-151
- 7 George D G, R W Edwards. The effect of wind on the distribution of chlorophyll a and crustacean plankton in a shallow eutrophic reservoir. *J Appl Ecol.* 1976, **13**:667-690
- 8 Horne A J, R C Wrigley. The use of remote sensing to detect how wind influences planktonic blue-green algal distribution. *Int Ver Theor Angew Limnol Verh.* 1975, **19**:784-791
- 9 杨清心.太湖水华成因及控制途径初探.湖泊科学,1996, **8**(1):67-74

## THE DYNAMIC RESEARCH OF THE INFLUENCE OF WIND FIELD ON THE MIGRATION OF ALGAE IN TAIHU LAKE

Zhu Yongchun    Cai Qiming

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

### Abstract

A three-dimensional model in which the effects of buoyance and wave are considered is developed to demonstrate how the tendency of algae to move, coupled with wind-induced circulation, leads to horizontal and vertical heterogeneity in algae concentration in Taihu Lake. Results show that the distribution of algae will be different depending on whether the windspeed is higher or lower than the critical windspeed. If the windspeed is lower than the critical one, algae may migrate toward the downwind end of the lake and accumulate there. The floating algae are expected to remain on the surface. But above the critical windspeed, water surface becomes rough and waves take place. In that case, interactions between wind-generated turbulence, mean currents and waves cause algae to leave away from the water surface, so surface accumulation of algae do not occur again.

In summer, the algae of Taihu Lake migrate with southeast wind toward the northwest region of the lake and then form blooming there for low windspeed; but when the windspeed above the critical value, the wind-generated waves may impress the accumulation of algae and make algae distribute more uniformly in the lake. This result is verified by the observed data of Taihu Lake.

**Key Words** the migration of algae, wind-generated waves, critical windspeed, Taihu Lake