

# 白洋淀水循环特点及其对生态环境的影响\*

马寨璞 赵建华 康现江 井爱芹

(河北大学生命科学学院 保定 071002)

**提要** 在理想假设下,利用 MITgcm 模式研究了风对白洋淀内水体循环流动的影响。研究指出:(1)风应力可看作是水体循环的主要驱动力;(2)在风应力的作用下,水体表层的流动主方向与风的方向一致,下层水体的流动方向与表层方向相逆或近似相逆;(3)表层以下水体流动复杂,次表层水平流动有明显的双漩涡结构;(4)淀底地形对水体垂向流动影响很大,垂向速度变化复杂,垂向上有双涡流动现象,靠近岸边多有上升流和下降流;(5)淀内水体流动沿着水平和垂向两个方向流动,在冬季和夏季流向相反。在分析以上流动特点的基础上,讨论了流动对各个不同子区域的生态环境可能造成的影响:I 区域是一个相对独立的水体区域,该区域内的水体污染物自成系统,与外界交换较少。而对 A、B、C、D 四个区域内的污染物分布等要统一考虑,四个区域内的水体交换,可看作是一个统一的整体。E、F 区域内的水体流动受到上述 A、B、C、D 四区内双涡流动的影响,但在这两个区域靠近岸边有强烈的上升流和下降流,有可能使得污染物的分布更加复杂。G、H 水深很浅,水流速度缓慢,受到污染后污染物不易扩散。

**关键词** 白洋淀,环境保护,环流,风应力,数值模拟

**中图分类号** P731

白洋淀是我国河北地区重要的湖泊之一。淀区周围人口密集,生态资源丰富,淀内有许多国家级保护鸟类和哺乳动物(张素珍,2003)。但由于近年来华北地区气候干燥,降水减少,加上淀区周围城市污染物的超标排放,白洋淀已经受到了较严重的污染。经张芸等(1999)调查,白洋淀水质污染属于有机型污染。

目前的白洋淀近似于封闭水体,而封闭水体最容易受到持续性有机化合物的污染(Loganathan *et al* 1994)。对于白洋淀污染物的分布,众多文献(冯建社,1999;王怡中等,1999;毛美洲等,1995;窦薇等,1998)从生物、化学等不同角度进行了研究,得到了许多重要的结论,为治理白洋淀的污染提出了各自的方法。但这些文献均未考虑淀内水体的流动,没有考虑动力学的因素。本文作者从流体动力学的角度,在理想假设状态下,研究了白洋淀内水

体的流动,并在流动的基础上,着重研究了流动对污染物分布规律的影响,为治理和控制白洋淀污染提供动力学的依据。

## 1 白洋淀区域及理想假设

白洋淀位于河北平原,具体位置位于 38°43'—39°02'N, 115°38'—116°07'E 之间。白洋淀四周主要以堤坝为界,东至千里堤,西至四门堤,北至新安北堤,南至淀南新堤,东西长 39.5km,南北宽 28.5km,总面积 366km<sup>2</sup> (十方院大沽高程 10.5m)。

白洋淀在面积为 6.6km<sup>2</sup> 以上的湖泊有 9 个,其地形地貌有很大的差别,据联合国教科文组织(UNESCO)1989 年推荐的方法,白洋淀划分为 A、B、C、D、E、F、G、H、I 九个区域(赵英魁等 1995)(图 1),各个区域的平均深度如表 1 所示。为计算方便,作为理想状态,数值模拟没有考虑

\*河北省科技攻关项目(白洋淀及其上游河流生物多样性与生态修复措施),06276902d 号;河北省科技攻关项目(白洋淀数字化管理预报系统研究),06276906 号。马寨璞,副教授, E-mail: mazhai pu@yahoo.com.cn

收稿日期:2006-01-07; 收修改稿日期:2007-04-06

表1 白洋淀9个分区的平均水深

Tab.1 Average depth of Baiyang Lake in every division

区域序号	A	B	C	D	E	F	G	H	I
平均深度(m)	1.83	2.52	2.14	1.95	2.25	2.77	1.77	0.79	0.77

芦苇的影响,认为白洋淀是一水面开阔的水体。另外,由于气候干燥,降雨减少,没有考虑降水、蒸发和径流的因素。

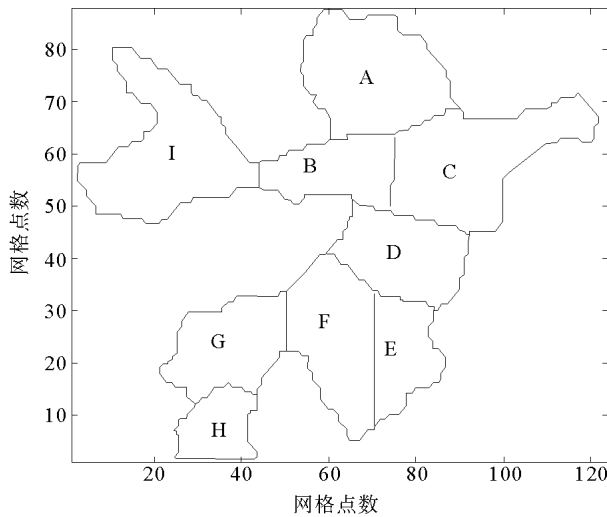


图1 白洋淀的功能分区

Fig. 1 The functional division of Baiyang Lake

## 2 计算过程

### 2.1 模型

本文中作者计算使用的是美国麻省理工学院的 MITgcm 模型(具体参看 <http://mitgcm.org/>),该模型除可以计算海洋流动、内波、大气环流、数据同化外,还可以计算诸如旋转圆盘上的水流流动等,具有半自动化的特性,针对一般的计算问题都有固定的计算模式,只需设定不同的参数就可。在正压下,MITgcm 模型以静力学的方式组织起来,在自由表面上,其压力方程以隐格式的形式出现。对此,Marshall 等(1977)人曾专门介绍过。在水平方向上,拉普拉斯算子  $\nabla_h^2$  提供了粘性耗散。风应力以动量的形式加到速度方程中,在本次的试验中,方程的基本形式为

$$\frac{du}{dt} - fv + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - A_h \nabla_h^2 u - A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\tau_x}{\rho_0 \Delta z} \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + g \frac{\partial \eta}{\partial y} - A_h \nabla_h^2 v - A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{\tau_y}{\rho_0 \Delta z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (3)$$

式中,  $f$  为科势力项;  $u, v$  为水流流速的东分量

和北分量;  $A_h$  为水平涡粘性系数;  $\eta$  为瞬时水面高度偏移量;  $\vec{u}$  为速度矢量;  $A_z$  为垂向扩散系数; 对于计算模型方程的封闭,本文作者采用修改 MITgcm 模型给定参数的方法,选择合适的方法使得模型封闭(在模型的参数设定表中设定封闭参数)。

### 2.2 计算网格的划分与步长设定

为了很好地模拟淀内水体的流动,在满足模型要求的各种稳定性基础上(满足 Munk 层宽限制,满足拉普拉斯摩擦参数稳定性的要求,满足模型固有的震荡稳定性,满足 CFL 计算稳定性),本着计算高分辨率的原则,将计算区域划分为  $124 \times 88 \times 6$  的网格,即东西方向 124 个网格,南北方向 88 网格,垂向 6 层,在水平方向上,网格尺寸为  $\Delta x = \Delta y = 100\text{m}$ ,在垂向方向上  $\Delta z = 0.5\text{m}$ ,时间步长取为  $\Delta t = 10\text{s}$ 。

### 2.3 风应力

白洋淀上游有众多的河流,下游有泄洪出口,但近年来华北地区干旱少雨,许多河流已常年断流。因此,从整个区域来看,白洋淀是一个相对封闭的水体。华北地区常年多风,冬季多为西北风,夏季多东南风,是典型的暖温带大陆性季风气候。在没有入流、出流的情况下,风应力则是淀内水体运动的主要驱动力。为此,以冬、夏两季的风应力作为白洋淀水体运动的驱动力,结合河北气象观测站泊头分站的 2003 年的风力情况(表 2),在冬季,取 12 月、1 月、2 月三个月的平均风速作为冬季的平均风速,即  $1.3\text{m/s}$ ;在夏季,取 6 月、7 月、8 月三个月的平均风速作为夏季的平均风速,即  $1.74\text{m/s}$ 。风作用于开阔的水体表面,作者认为切应力等于风应力(没有其他外部驱动力),采用式 (4)、(5) 予以处理,将风速转换为风应力。另外,考虑风力大小在吹过障碍物后的恢复特性,这里对风应力的分布做了些调整,以使之更符合实际情况。图 2 给出冬季的风应力分布(夏季图略)。

$$\tau_s^x = \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} / \rho \quad (4)$$

$$\tau_s^y = \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} / \rho \quad (5)$$

式中,  $\rho_a$  为空气密度;  $\tau_s^x, \tau_s^y$  为  $x, y$  方向上的风

表 2 泊头站 2003 年气象资料(摘自河北气象网)

Tab.2 Average wind speed at Botou Observatory (After Hebei Meteorology Net, 2003)

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
月均风速(m/s)	1.3	1.4	2.1	2.7	2.4	2.1	1.6	1.5	1.9	2.1	1.6	1.3

应力;  $w_x, w_y$  为  $x, y$  方向上的风速度;  $C_D$  为水气界面的摩擦系数。

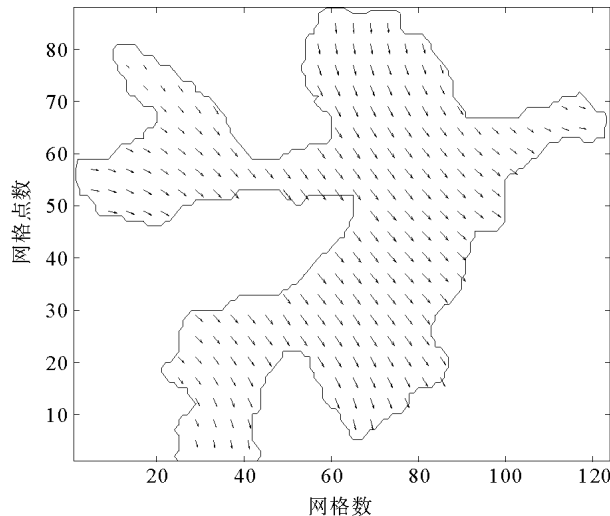


图 2 白洋淀冬季风应力分布

Fig. 2 Distribution of wind stress in winter

### 3 计算结果

由于白洋淀淀内水深很浅, 最深只有 3m 左右, 因此, 本文中设定了较细的网格和较小的步长, 在程序运行稳定后, 得到了白洋淀各个不同分层及纵横断面上的速度分布情况, 具体讨论如下。

#### 3.1 水平方向上

图 3 给出了冬季(夏季图略,下同)白洋淀各层水平速度分布。由表层图可知, 在定向风的驱动下, 开阔水面的水流流向与风的方向相同, 风应力控制着表层水的主要流动方向, 在靠近岸边的地方, 由于岸线的作用, 流向发生了变化, 与风力方向有些偏差。另外, 在 A、H、I 三个较浅的区域, 和其他较深水域相比, 表面流速较小。在 F 区的北部, 和 D 区交接的位置, 流速也较小, 这可能是由于水深变化较大造成, 也可能是岸线地形造成, 有待于进一步研究。由此可知, 风应力可以看作是白洋淀水体产生循环流动的主要动力。

图 3 中给出的冬季白洋淀次表层水平速度分布表明: 在定向风的作用下, 次表层水的流动很复杂。在开阔水面处, 表层水水平流速较大, 则次表层水的流向与之相同, 反之, 则次表层水的

流向与之相逆或近似相逆。这是由于白洋淀是一个相对封闭的水体, 次表层水作为表层水的“源”, 回流补充表层水的流失。值得注意的是, 在次表层水中, 无论冬季、夏季, 在定向风的驱动下, 在开阔水域都有两个明显的漩涡, 在冬季风的作用下, 靠近北部的涡是逆时针方向, 而靠近南部的涡为顺时针方向。在夏季风的作用下, 则涡的方向相反, 靠近北部的涡是顺时针方向, 而靠近南部的涡为逆时针方向。由此可知, 在次表层, 水的循环流动构成了两个涡。此外, 由于 I 区水深较浅, 从次表层可以看到, 它的水流方向与相邻的 B 区的次表层水流方向相反, 因此可以断定, 在这两个区域的交界面处, 次表层水流速度有零值出现, 这说明 I 区的水的循环主要是自己区域内的水体循环, I 区实际上可看作是一个更小的相对封闭的区域。

图 3 中给出的冬季白洋淀第 3 层的水平速度分布显示出: 在第 3 层, 其流向与风向相反, 但因为受水深地形的影响较大, 水流流向多为南 - 北流向, 且流速较小。

图 3 中还给出了冬季白洋淀近底层第 5 层水平流动。在这层中, 水流流向和第三层基本相同, 但流速较第 3 层有变大的趋势, 尤其是在水深较大的 F 区, 近底层的流速要比第 3 层较大一些。

综上所述, 在定向风的作用下, 在水平方向上, 表层水的流向主体与风吹方向一致, 风应力控制着表层水的流动。但在水深 0.5—1.0m 范围内, 水流流向则有逆转, 流动复杂, 除开阔水面处的流速较大而使得次表层水流方向未改变外, 其他区域流动方向发生了逆转, 并形成了两个明显的涡。在第 3 层, 水平流动的方向以沿着南 - 北方向为最主要特征。

#### 3.2 垂直方向上

为了了解白洋淀内水体在垂向上的具体流动情况, 作者选择有代表性的两个截面, 设 A 断面是沿着东 - 西方向的断面, 即  $Y=56$ 。设 B 断面是沿着南 - 北方向的断面, 即  $X=70$ , 选取这两个截面, 主要是考虑在两个方向上尽可能多地穿过水域, 如图 4 所示。

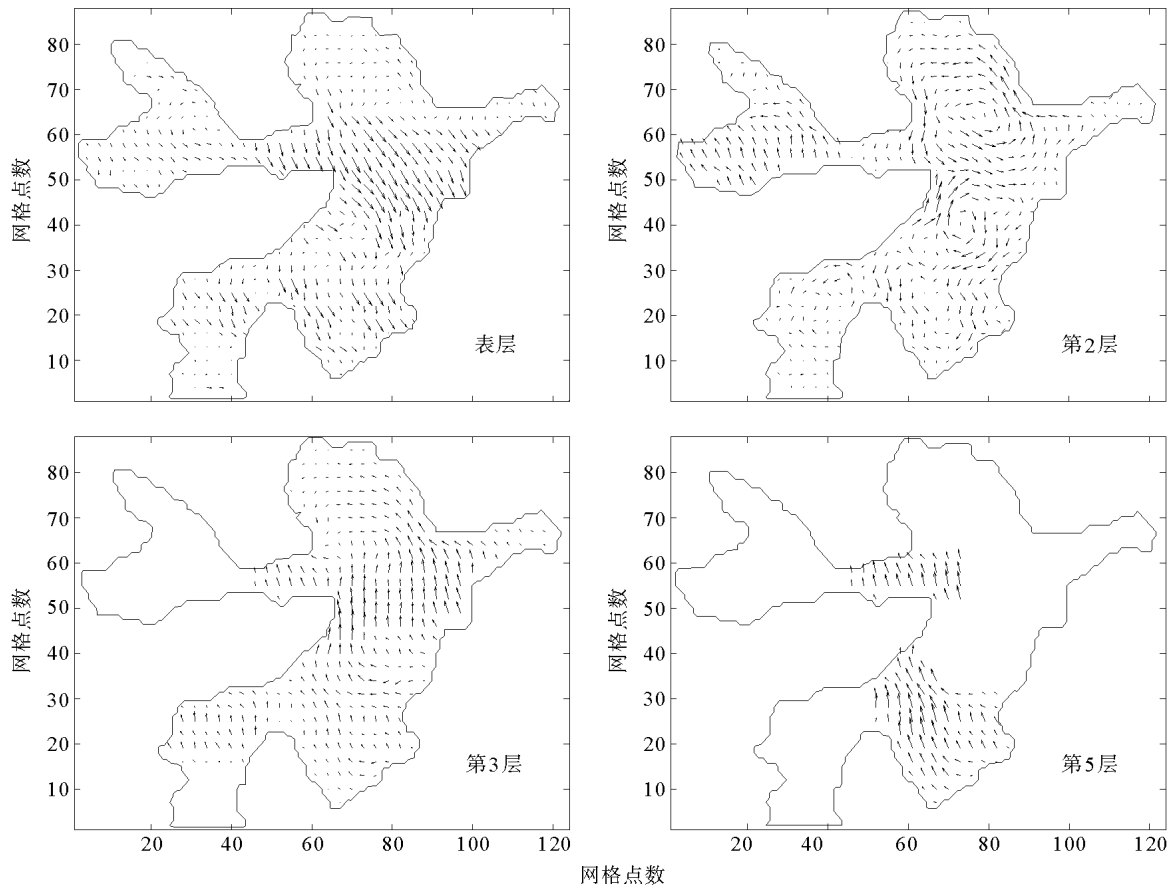


图3 冬季白洋淀各层水流流动

Fig. 3 The flow velocity distribution of in different layers of Baiyang Lake in winter

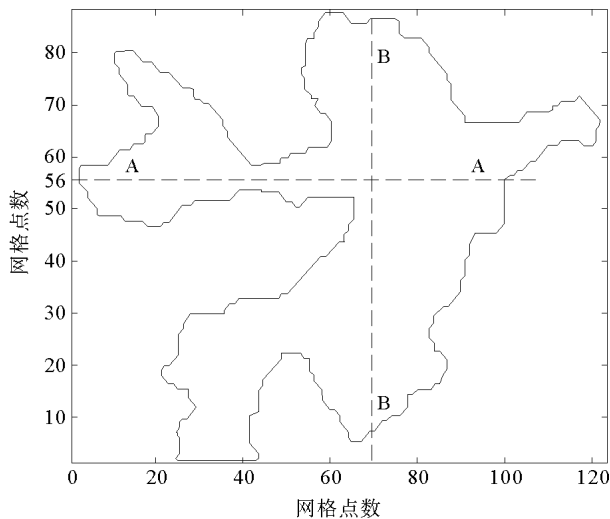


图4 计算区域内的典型截面

Fig. 4 Positions of representing Sections A and B in Baiyang Lake

图5给出了冬季白洋淀A断面垂向速度分布。由图5可知,在定向风的驱动下,沿东-西方向A-A断面上的速度分布因季节不同而相反,在冬季表现为上升流的位置,夏季则为下降流,在冬季为下降流的位置,到夏季则为上升流。而无论冬季、夏季,I区的流动在垂向上都是自成系

统,与其他几个区域的水体交换量很小。沿着A-A断面有3个不同深度的区域,在B区(图上 $X = 40-80$ 之间),垂向对流可到底层,但在整个深度上并不是一个完整的对流,而是有两个对流涡,以冬季的情况为例,在垂向上,从表层到第2层,B区东部是下降流,B区西部是上升流,这构成一个循环,在该循环下方,即3—6层的深度上,B区东部是上升流,B区西部是下降流,但和表层、次表层垂向速度相比,水流速度明显偏小,可能是由于上面的对流而引起的附属性对流现象,有待进一步探讨。夏季的情况与此类似,不再讨论。

对于冬季白洋淀B断面(图略)的垂向速度分布。计算表明:在定向风的驱动下,沿着南-北方向,无论冬季、夏季,垂向速度分布都很紊乱,上升流与下降流交杂在一起,极值点出现在沿着Y轴的 $Y=20$ 与 $Y=60$ 附近,但冬、夏季节速度方向相反。因此,沿着南-北方向,水体循环可一直达到水底。另外,等值线图表明:接近水体的表面处几乎没有垂向速度,多数在表层与次表层之间位置开始出现垂向速度。

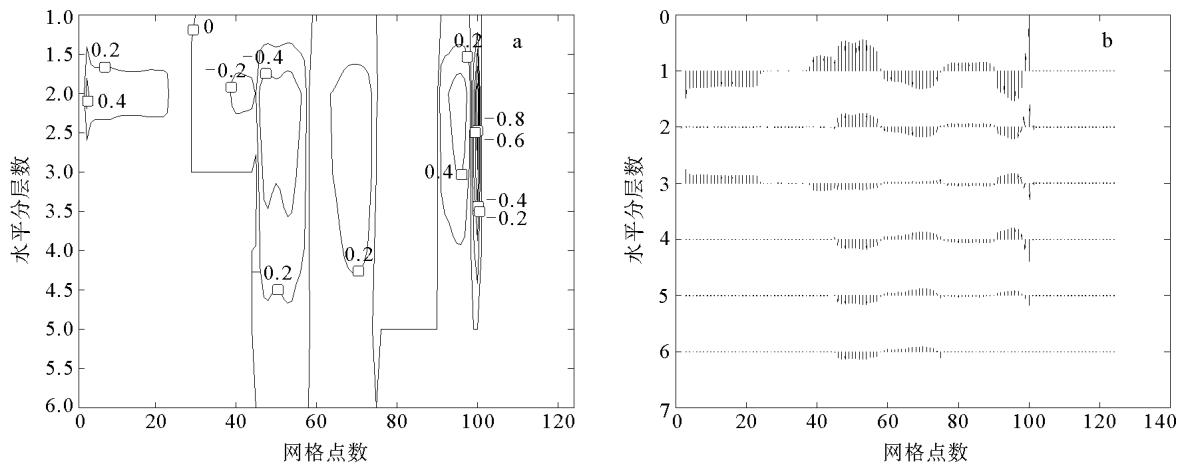


图5 冬季 A-A 断面垂向速度分布。(a) 等值线图;(b)矢量图

Fig. 5 Velocity distribution of Section A-A in winter. (a) contour line; (b) vector graph

总之,在垂向上,沿着东-西方向,有明显的上升流与下降流,从而有明显的上升与下降区域,且有主对涡流与附属对涡流出现。而沿着南-北方向,上升流与下降流相间出现,对流十分杂乱。

#### 4 水流流动对生态环境的影响

从上述计算得到的流动特点可知,I区是一个相对封闭的小区域,该区域内的水体循环以水平流动为主,只有在靠近东、西近岸边区域,才有垂向流动。因此,I区域内的流动可看作是准二维流动。在这个小区域内,水体在风应力的作用下,能够充分的进行混合,从而使得污染物在该区域中的分布很均匀,与其他区域水体中的污染物分布相比,更具有自己的特点。窦薇等(1998)对白洋淀水体中的 DDT、BHC 等进行研究后发现:I 区域水体中的 DDT 等残留量于其他区域明显不同,I 区域水体相对封闭,流速缓慢,是此区域水体中 DDT 残留量的异常的一个原因。BHC 分布不太一样,可能与本文所作的理想假设情况有关,有待进一步优化计算模型。

A、B、C、D 四个区域,虽然总体深度不同,但在次表层深度的流动中,双涡流动结构跨越这四个区域,可看作一个整体。因此,流动对生态环境的影响,在这一深度是一致的。水体中的污染物浓度分布在这一区域也将会是一致的。值得注意的是,双涡流动结构的涡心处,由于水平流速较小,垂向速度较大,且能够到达较深的水底,因此,流动对水体中的污染物垂向分布将产生影响。两涡之间,水流速度较大,水生植物很难附

着,这对水生植物的生长分布将产生影响。田玉梅等(1995)对白洋淀水生植物进行了研究,在对应于双涡的位置,水生植物分布明显减少。作者认为:涡间流速较大是造成植物在旋涡区域分布较少的一个主要原因。

E、F 区域的流动和 A、B、C、D 区域的流动相关联。在次表层,E、F 区域的水平流动受到上述双涡流动结构的影响。在冬季,双涡中靠近南部的涡呈顺时针旋转流动,在靠近西岸附近,受岸边地形的阻挡,部分水流向南进入 F 区,驱动 F 区域内的水体流动。而 D 区东部的部分水流流向 E 区。这两股水流均向南流动,在靠近两个区域的南部汇合,汇合位置附近水平流速变小,但下降流形成,且下降流速度较大。因此,在冬季,E、F 两个区域的南岸附近,其下降流有可能对该区域的污染物向深层输运产生较大影响。向下的水流对该区域的底泥产生较强的扰动,同样也会影响该区域的生态环境。在夏季,E、F 两个区域的南岸附近又会出现上升流,这又会把靠近底部的水体以及底泥中残留的污染物带入表层水体中,使得水体生态环境恶化。对比 E、F 区域,发现 F 区域西北部靠近岸边的流速要比 E 区域东部靠近岸边的流速小,这将使得 F 区域西北部近岸比 E 区域东部近岸更适合于水生植物生长。

G、H 两个区域水深很浅,水流完全受季风控制,流速缓慢,一方面对水生植物生长有利,另一方面对污染物的扩散产生阻碍,不易扩散。

#### 5 结论

(1)平流动为主,风应力可看作是水体循环的

主要驱动力。在风应力的作用下,水体表层的流动主方向与风的方向一致,下层水体的流动方向与表层方向相逆或近似相逆。表层以下水体流动复杂,次表层水平流动有明显的双涡结构。

(2) 淀底地形对水体垂向流动影响很大,垂向速度变化复杂,垂向上有双涡流动现象,靠近岸边多有上升流和下降流。淀内水体流动沿着水平和垂向两个方向流动,在冬季和夏季他们的流向相反。

(3) 在分析以上流动特点的基础上,讨论了流动对各个不同子区域的生态环境可能造成的影响: I 区域是一个相对独立的水体区域,在理想状态下,该区域内的水体污染物自成系统,与外界交换较少。而对 A、B、C、D 四个区域内的污染物分布等要统一考虑,四个区域内的水体交换,可看作是一个统一的整体。E、F 区域内的水体流动受到上述 A、B、C、D 四区内双涡流动的影响,但在这两个区域靠近岸边有强烈的上升流和下降流,有可能使得污染物的分布更加复杂。G、H 水深很浅,水流速度缓慢,受到污染后污染物不易扩散。

## 参 考 文 献

- 毛美洲, 刘子慧, 董惠茹, 1995. 府河—白洋淀水及沉积物的污染研究. 环境科学, (16 卷增刊): 1—4
- 王怡中, 刘季昂, 胡春等, 1999. 白洋淀地区水中有机污染物的定性分析. 环境化学, 11(5): 441—448
- 冯建社, 1999. 白洋淀的纤毛虫及与水质污染的关系. 重庆环境科学, 21(5): 33—35
- 田玉梅, 张义科, 张雪松, 1995. 白洋淀水生植被. 河北大学学报(自然科学版), 15(4): 59—66
- 张芸, 王秀兰, 李兵, 1999. 白洋淀污染机理及防治探讨. 水资源保护, 4: 29—32
- 张素珍, 2003. 白洋淀湿地生态功能评价及保护对策. 石家庄师范专科学校学报, 5(3): 40—41, 44
- 赵英魁, 张秀清, 马大明等, 1995. 白洋淀功能区划分原则. 环境科学, (16 卷增刊): 41—42, 46
- 窦薇, 赵忠宪, 1998. 白洋淀水体、底泥及鲫鱼体内 DDT、BHC 污染状况研究. 环境科学学报, 18(3): 1—3
- Marshall J, Hill C, Perelman L *et al*, 1977. Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and non hydrostatic ocean modeling. JGR, 102(c3): 5733—5752
- Loganathan B G, Kanna K, 1994. Global organochlorine contamination trends: an overview. *Ambio*, 23: 187—191

## THE WIND-DRIVEN WATER CIRCULATION IN BAIYANG LAKE, CHINA AND THE IMPLICATION TO ENVIRONMENTAL REMEDIATION

MA Zhai-Pu, ZHAO Jian-Hua, KANG Xian-Jiang, JING Ai-Qin  
(*Department of Ocean Science, Hebei University, Baoding, 071002*)

**Abstract** The distribution and influence of wind stress on the water circulation in Baiyang Lake was simulated with MITgcm model. The results show that wind stress was the main driving force on the water circulation, as the water of surface layer moved in wind direction, while in underneath deeper layers, it was reversal or nearly reversal to the upper one's in more complex circulation pattern. Double eddies were clearly shown in the second horizontal layer. The topography of lake bottom complicated further the patterns of vertical flow with double eddies. In overall, the lake water circulation was in two directions, horizontal and vertical, regardless of seasonal change. In specific, Area I was an isolated area with stagnant water, while open Areas A, B, C, and D should be treated as a whole in terms of water exchange when pollution is studied. In Area E and F, water circulation was affected by the double-eddy in above-mentioned four areas, and by additional upward and downward flows near lake bank, which made the pollutant distribution more complicated. In shallow Areas G and H, slow-moving water would hold contaminant from dilution. Understanding in detail the circulation in the lake will help protect local environment and ecosystem from pollution and deploy remediation implementation.

**Key words** Baiyang Lake, Environment protection, Water circulation, Wind force, Digital simulation