

太湖水动力学三维数值试验研究 ——3. 马山围垦对太湖风生流的影响

胡维平 秦伯强 濮培民

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

提 要 地形是决定湖泊流场的大小和结构的重要因素. 它会影响到湖泊水体内的物质输移与扩散和水质的分布. 因而弄清马山围垦对湖流的影响有助于了解无锡市重要饮用水水源地梅梁湖的藻类“水华”和水质变化规律. 本文在太湖风生流的三维数值模拟的基础上, 用数值试验方法探讨了马山围垦对湖泊流场的影响. 结果表明: 虽然围垦对表层及底层风生流影响较小, 但是对中间转换层的流场影响较大, 对整层平均流场影响更大. 在多数风场作用下, 围垦虽未对太湖南部水域的整层平均流场产生明显影响; 但在某些风场如西南作用下, 围垦却引起了梅梁湖和竺山湖的整层平均流场结构和大小的巨变, 并严重影响梅梁湖与大大湖水量的净交换, 制约梅梁湖及竺山湖与大大湖的水量的交换, 对梅梁湖湾顶水质造成不利的影响.

关键词 风生流 地形 围垦 太湖

分类号 P343.3

湖盆形态是约束湖水运动的重要条件. 它不但影响湖泊内水位的变化, 而且还会影响到水体运动速度的大小和方向以及流场的结构和特征, 进而影响各种物质在湖泊内扩散输移, 从而对湖泊的水质及生态系统产生重要影响. 因此地形对湖泊流场影响为湖泊物理学及湖泊生态环境研究的重要内容. 但在太湖, 涉及这一方面的研究较少. 地形特别是太湖马山区域围垦对湖泊流场的影响及对无锡市重要饮用水源地梅梁湖与大大湖(西太湖)水体影响是目前期待研究的重要课题之一, 也是当前太湖生态环境管理与改善太湖局部水域水质, 降低太湖藻类“水华”危害, 促进区域经济可持续发展的重要的研究课题之一.

基于太湖水动力学三维数值试验研究的前期研究成果^[1,2]及太湖马山未围垦前的地形图^[3], 进行太湖盛行东南风, 西北风及西南风的湖流数值试验. 在此基础上, 对比分析围垦前后两种不同地形条件下太湖分层流场及整层平均流场的差异, 从而给出马山围垦对太湖流场的影响.

1 湖水运动的控制方程

在图1所示的压缩 σ 坐标系 (x, y, σ) 中, 太湖湖水运动控制方程为^[2,4,5]:

$$\frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} + \frac{\partial(Hw^*)}{\partial \sigma} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

• 中国科学院“九·五”重点项目(KZ952-S1-220)和(KZ952-J1-212), “九·五”重大项目(KZ951-B1-205-02)和中国科学院“九·五”特别项目(KZ951-A1-301)联合资助.

收稿日期: 2000-09-10. 胡维平, 男, 1965年生, 副研究员.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w^* \frac{\partial u}{\partial \sigma} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A_v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(A_z \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + \epsilon_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w^* \frac{\partial v}{\partial \sigma} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + A_v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(A_z \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + \epsilon_y \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } \epsilon_x = Ah \left\{ \frac{2}{H} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial \sigma} \left(\frac{\partial h}{\partial x} - \sigma \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial \sigma^2} \frac{1}{H^2} \left(\frac{\partial h}{\partial x} - \sigma \frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 - 2 \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{1}{H^2} \frac{\partial u}{\partial x} \left(\frac{\partial h}{\partial x} - \sigma \frac{\partial H}{\partial x} \right) \right. \\ \left. + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{1}{H} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - \sigma \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \right) + \frac{2}{H} \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial \sigma} \left(\frac{\partial h}{\partial y} - \sigma \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial \sigma^2} \frac{1}{H^2} \left(\frac{\partial h}{\partial y} - \sigma \frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 \right. \\ \left. - 2 \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{1}{H^2} \frac{\partial H}{\partial y} \left(\frac{\partial h}{\partial y} - \sigma \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{1}{H} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} - \sigma \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) \right\} \end{aligned}$$

ϵ_y 的表达式和 ϵ_x 的表达式相同, 只要把 u 换成 v 即可。

在以上方程中 u, v 分别为流速在 x, y 轴方向的分量, ζ 为湖面偏离初始水平面的位移, A_v, A_z 分别为水平和 σ 方向湍粘系数, H 为从湖面到湖底的深度, h 为从平衡位置到湖底的水深. x 轴向东, y 轴向北(图 1).

控制方程的上边界为:

$$\sigma = 1 \text{ 时: } w^* = 0 \quad \rho \frac{A_v}{H} \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = (\tau_x^s, \tau_y^s) = C_D^s \rho_a \sqrt{u_a^2 + v_a^2} (u_a, v_a)$$

下边界条件为:

$$\sigma = 0 \text{ 时: } w^* = 0 \quad \frac{A_v}{H} \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = (\tau_x^b, \tau_y^b) = C_D^b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} (u_b, v_b)$$

其中 ρ, ρ_a 为水和空气的密度, C_D^s, C_D^b 为表层和底层的拖曳系数, u_a, v_a, u_b, v_b 为风速和湖底流速在 x, y 方向的速度分量. 方程的侧边界条件为法向速度为零.

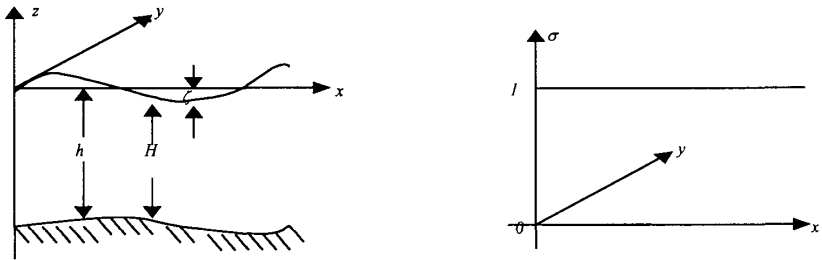


图 1 σ 坐标系及参量 H, h, ζ 物理意义示意图

Fig. 1 Sketch map of σ coordinate system and the corresponding parameters

2 计算结果

模型采用的差分格式及各变量和参数在水平方向垂直方向的格点分布, x, y 方向的网格步长、 σ 方向层数^[1,2]. 模型计算涉及的马山区域围垦前的太湖地形图见图 2. 围垦后的太湖地形图见文献[1].

2.1 西北风

西北风为太湖在冬季的盛行风. 此种情况基本代表太湖在冬季的水动力学状况. 在此风向

的作用下,太湖围垦前除转换层流场外,其它各层流的大小与分布和围垦后的对应各层流场在太湖南部无明显差异,但是在马山围垦附近水域梅梁湖等存在着一定的差异.图 3 和图 4 为 $11.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 西北风作用下梅梁湖与大大湖及梅梁湖与竺山湖各水层上的水量交换随风场作用的时间的变化.从中可以看出,尽管在风作用的起始阶段,由竺山湖流入梅梁湖的水量较梅梁湖流入大大湖的水量小,但是随风场作用时间的增加,流场趋于稳定,各层水量交换减少,竺山湖进入梅梁湖水量占梅梁湖流出水量的比例越来越大.就垂直方向的平均流量而言,竺山湖流入水量占梅梁湖流出的水量比例更高.但梅梁湖和竺山湖净水量的交换较小.这说明在此风向作用下马山围垦对围垦区附近局部水域水流有一定影响,但不是很大.在稳定状态下围垦影响竺山湖与梅梁湖的水量交换流



图 2 太湖围垦前湖底地形图
Fig. 2 The topographical map of Taihu Lake before reclamation

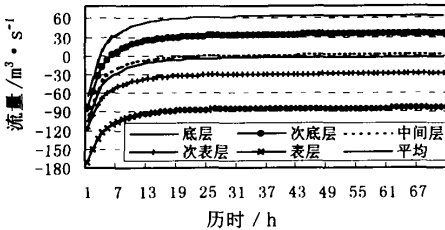


图 3 $11.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西北风作用下,马山围垦前梅梁湖与大大湖的水量交换
Fig. 3 The water exchange rate between Meiliang Bay and open lake under the northwest wind speed of $11.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ before reclamation

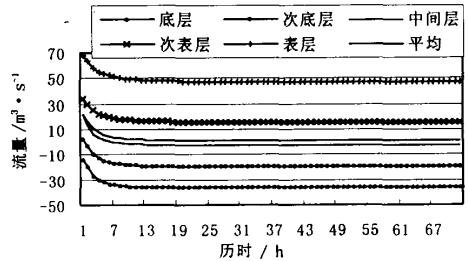


图 4 $11.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西北风作用下,马山围垦前梅梁湖与竺山湖的水量交换
Fig. 4 The water exchange rate between Meiliang Bay and Zhushan Bay with the northwest wind speed of $11.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ before reclamation

量为 $4.0\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.以上结果也可从该风场作用下流场稳定时,马山围垦前太湖垂直方向平均的二维流场的水平分布图 5 中看出.比较图 5 中流场结构与文献^[1,2]相应风场作用下的流场,可以发现除流场的流速大小因风速大小不一样而不同外,两流场的结构及环流分布的位置无显著差异,尤其是在太湖的南部水域.

2.2 东南风

东南风及下面将要阐述的西南风为春夏秋季节常见的风场,对这两种风场的探讨和研究有利于认识以上三季节太湖水动力学特征.图 6,图 7 为 $11.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 东南风作用下,各水层和

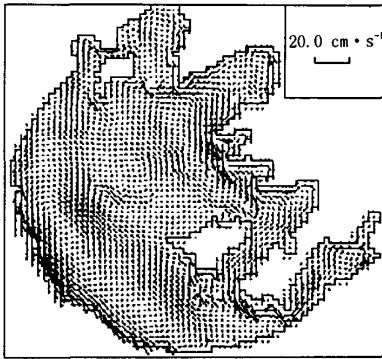


图 5 11.3m·s⁻¹西北风作用下围垦前
稳定状态下垂直方向平均流场
Fig.5 The averaged stable water
current pattern at vertical
irection with northwest wind speed of
11.3m·s⁻¹ before reclamation

垂直平均条件下梅梁湖与大大湖及梅梁湖与竺山湖的水量交换.从图 6 可以看出,在风场作用的起始阶段,各水层的水体均从大大湖流入梅梁湖,最大的表层流量达 170m³·s⁻¹,较小的底层流量也超过 50m³·s⁻¹.随风作用时间的增加,表层与次表层流量减小,并逐步达到稳定状态,流量方向不变.中间层流量减少并逐步逼近 0 流量.底层与次底层流量先减少,当减少到 0m³·s⁻¹后,流向改变.此时在底层和次底层,湖水由梅梁湖流向大大湖,流量逐渐加大直到达到最大值.在稳定状态,表层流量为 100m³·s⁻¹.底层为 70m³·s⁻¹.图 7 显示,在风作用的起物阶段除底层竺山湖水体流入梅梁湖外其他各层水体从梅梁湖流向竺山湖.底层和次底层流量随风作用时间的增加而增加,其他各层则随风作用时间的增加而减少.至稳定状态表层流量为 57m³·s⁻¹,底层为 55m³·s⁻¹.整层平均接近 0m³·s⁻¹.

该风场持续作用下稳定的整层平均流场见图

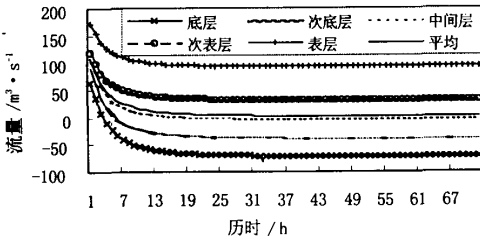


图 6 11.3m·s⁻¹东南风作用下马山区未围垦
梅梁湖与大大湖的水量交换
Fig.6 The water exchange rate between
Meiliang Bay and open lake with the southeast
wind speed of 11.3m·s⁻¹ before reclamation

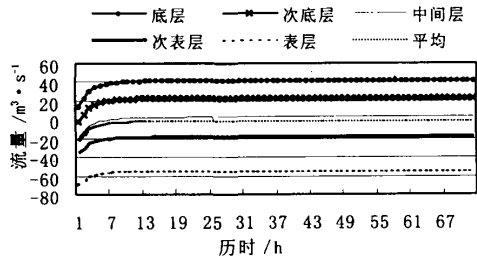


图 7 11.3m·s⁻¹东南风作用下马山区未围垦
梅梁湖与竺山湖的水量交换
Fig.7 The water exchange rate between
Meiliang Bay and Zhushan Bay with the southeast
wind speed of 11.3m·s⁻¹ before reclamation

8. 除梅梁湖与竺山湖外,该图中的流场结构及环流分布位置与文献中相应风场作用 72h 时的整层平均流场的结构及环流的分布一致,这说明马山的区域围垦对除梅梁湖和竺山湖以外水域的流场影响较小.在梅梁湖水域,马山区域的围垦虽对湾内流场造成了一定影响,例如改变了湾内小环流的位置,但并未对梅梁湖湾及竺山湖湾口区域流场造成太大的影响.这说明该风场仅改变了梅梁湖及竺山湖内部的流场,未影响其他区域.

2.3 西南风

西南风作用下,马山区域围垦前后梅梁湖湾与大太湖在各水层的水量交换随时间的变化见图 9,图 10.在风作用的起始阶段不论马山围垦前还是围垦后,梅梁湖湾内湖水均流向大太湖,流量随风作用时间减少.但是围垦前中间层,次底层,底层的流量减少到 0 后,流向发生改变,流量逐渐增大.风场作用 13h 后,不论是围垦前还是围垦后各水层的流量均接近稳定状态.27h 后,各水层的流量达到稳定状态.比较围垦前后各水层流量的变化可以发现:围垦除对中间层流量影响较大外,对其他各层的流量影响较小.但是整层平均流量在围垦前后,却存在较为明显的差距,围垦后梅梁湖与大太湖湖水的净交换量为 $0.59\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,而围垦前则为 $26.68\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,二者相差较大.这明在此风场作用下,马山围垦对梅梁湖湾与大太湖水量交换影响较大.图 11 为梅梁湖与竺山湖水量交换随时间的变化.从图中可以看出各层水量交换随时间的变化相对较小,至稳定状态表层,次表层流量,中间层流量分别约为 $5922.2\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$;底层,次底层流量分别约为 $39,19\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,流向与表层的相反.整层平均流量约为 $5.2\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.十分接近梅梁湖湾与大太湖的净交换水量.

西南风作用下,马山区域围垦前后太湖整层平均流场见图 12,图 13.二图显示在西南风作用的情况下,围垦前后的整层平均流场的差别很大.围垦前位于太湖西北部的顺时针环流沿湖西北岸线方向进入竺山湖,经马迹山北面的水域流至梅梁湖,沿岸线方向流至三山附近水域折向梅梁湖湾口方向,并从湾口的东部流出梅梁湖湾,沿西南方向流动.在此环流长时间作用下,滞留梅梁湖湾顶水体将得到更换.而围垦后以上的环流只能占据竺山湖、梅梁湖以南区域.对竺山湖、梅梁湖的交换影响很小.围垦后梅梁湖湾顶存在一个小顺时针环流,水体与大太湖的水量交换能力减弱,这将使闻江口流入的污水将留在湾顶区域,使湾顶水质恶化.

3 讨论

以上三种风场作用下的计算结果表明,马山区域围垦可对梅梁湖湾造成一定的影响.其影响程度见表 1.从表中可以看出,马山围垦对梅梁湖与太湖表层交换的影响较小,最大为

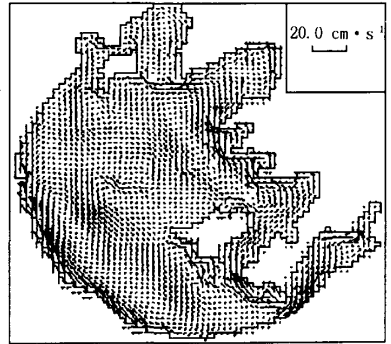


图 8 $11.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 东南风作用下围垦前稳定状态下垂直方向平均流场

Fig.8 The averaged stable water current pattern at vertical direction with southeast wind speed of $11.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ before reclamation

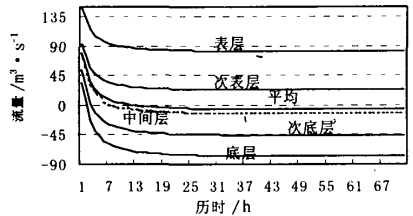


图 9 $11.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西南风作用下围垦前梅梁湖与大太湖的水量交换随时间的变化

Fig.9 The water exchange rate between Meiliang Bay and open lake with the southwest wind speed of $11.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ before reclamation

对竺山湖、梅梁湖的交换影响很小.围垦后梅梁湖湾顶存在一个小顺时针环流,水体与大太湖的水量交换能力减弱,这将使闻江口流入的污水将留在湾顶区域,使湾顶水质恶化.

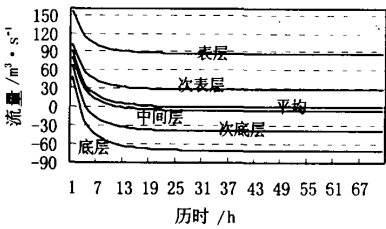


图 10 $11.3\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的西南风作用下围垦后梅梁湖与大大湖的水量交换随时间的变化

Fig.10 The water exchange rate between Meiliang Bay and open lake with the southwest wind speed of $11.3\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ after reclamation

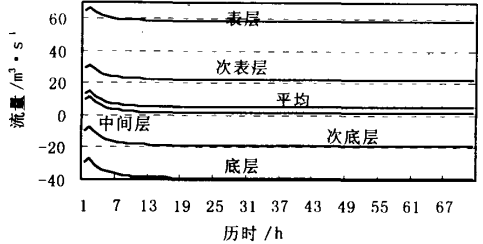


图 11 $11.3\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的西南风作用下围垦前梅梁湖与竺山湖的水量交换随时间的变化

Fig.11 The water exchange rate between Meiliang Bay and Zhushan Bay with the southwest wind speed of $11.3\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ before reclamation

5.03%，平均为 2.5%，对这次表层的影响较表层大，最大可达 18.3%，平均为 8.6%，对中间层的影响更大，最大为 45.1%，平均达 38.8%，往下对次底层和底层的影响又减小，最大分别为 13.5% 和 8.6%。围垦对湾口水量净交换影响特别地大，各种风向均超过 80%，最大达 97.8%。从以上结果可以看出围垦对梅梁湖与大大湖各层水体的水量交换影响不大，但在一定的风向条件下，马山围垦可对梅梁湖与大大湖的水体净交换量产生重大影响，例如西南风的作用。

表 1 马山围垦对梅梁湖与大大湖的水量交换影响 (+ 流入梅梁湖, - 流出梅梁湖)

Tab.1 The influences of reclamation in Mashan on the water exchange between Meiliang Bay and open Taihu Lake

风场	$11\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ NW			$11.3\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ SW			$11.3\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ SE		
	围垦前 $/\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	围垦后 $/\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	围垦的 影响%	围垦前 $/\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	围垦后 $/\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	围垦的 影响%	围垦前 $/\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	围垦后 $/\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	围垦的 影响%
表层	-83.667	-82.546	1.34	82.672	86.833	5.03	92.064	91.007	1.15
次表层	-28.414	-27.324	3.84	23.462	27.76	18.3	31.361	30.238	3.58
中间层	3.438	4.622	34.4	-10.950	-6.008	45.1	-3.779	-5.064	34.4
次底层	35.199	36.601	4.0	-45.165	-39.083	13.5	-38.723	-40.29	4.0
底层	65.863	67.299	2.2	-76.700	-70.092	8.6	-72.628	-74.299	2.3
净交换量	-7.58	-1.348	82.19	-26.68	-0.59	97.79	8.29	1.59	80.8

4 结论

从以上马山围垦对太湖流场影响及对梅梁湖湾与大大湖水量交换影响的分析和探讨中可以看出：(1)马山围垦对风生流表层及底层湖流影响较小，但是对中间转换层的流场影响较大；(2)在各种风向条件下，虽然马山围垦对太湖南部水域的整层平均流场的影响不明显，但在某些风向作用下，围垦可引起梅梁湖和竺山湖的整层平均流场结构和大小的改变，并制约梅梁湖及竺山湖与大大湖的水量的交换。(3)马山区域的围垦对梅梁湖与大大湖分层水量交换的

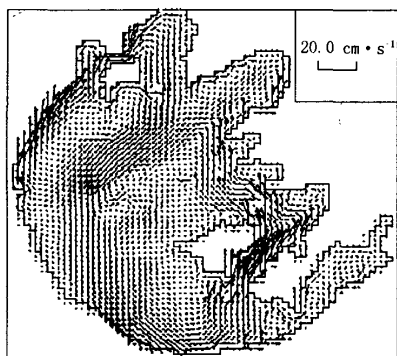


图 12 $11.3\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 西南风作用下围垦前
稳定状态下垂直方向平均流场

Fig. 12 The averaged water current pattern
at vertical direction with southwest wind
speed of $11.3\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ before reclamation

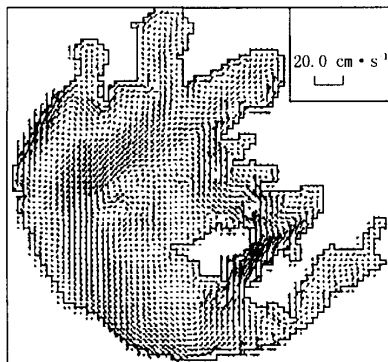


图 13 $11.3\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 西南风作用下围垦后
稳定状态下垂直方向平均流场

Fig. 13 The averaged water current pattern
at vertical direction with southwest wind
speed of $11.3\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ after reclamation

影响不大;但是在某些风向作用下,马山围垦对梅梁湖与大太湖水量的净交换影响有重大影响,如西南风.

参 考 文 献

- 1 胡维平,秦伯强,濮培民.太湖水动力学三维数值试验研究——1.风生流和风涌增减水的三维数值模拟.湖泊科学,1998,10(4):15-25
- 2 胡维平,秦伯强,濮培民.太湖水动力学三维数值试验研究——2.典型风场风生流的数值计算.湖泊科学,1998,10(4):26-33
- 3 孙顺才等.太湖.北京海洋出版社,1993
- 4 梁瑞驹,仲金华.太湖风生流的三维数值模拟.湖泊科学,1994,6(4):289-297
- 5 朱耀华,方国兴.陆架和浅海环流的一个三维正压模式及其在渤黄东海的应用.海洋学报,1994,16(6)

Three-dimensional Numerical Experiments on Hydrodynamics in Taihu Lake - 3. Influence of the Reclamation in Mashan District on Wind-driven Current

HU Weiping QIN Boqiang PU Peimin

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

Abstract

Terrain is an important factor influencing the velocity and the distribution of water current in

lake. It decides the substance transportation and diffusion in lake water. This induces the study on the influence of the reclaiming of Mashan District on wind-driven current to be important to know the change of water quality in Meilianghu Bay. The influences of the reclaiming of Mashan district on the wind-driven current were discussed on the base of the part 1 and part 2 of three three-dimensional numerical experiment on hydrodynamics in Lake Taihu, China. The results showed that the reclaiming in Mashan district had few influences on the layer water current except the conversion layer water current. As to the conversion layer, it has great influences on velocities and directions of the conversion layer water current and the vertical averaged water current. It decides the structure of the circulation formed by the vertical averaged water current near the Mashan District. In particular, in case there blows SW wind these kinds of influences are very strong, e. g. the reclaimment changed the flow direction and the location of the great-scale circulation in the west part of the lake, and restrained the water in the decreased the net water exchange rate between Meilianghu Bay and the open area of the lake by the reclaimment. Especially, in the case of SW, not only about 98% of the net water exchanges were cut down, but also the water exchanges on the layer blow surface layer, middle layer and the layer above the bottom layer were cut down in a relative high percentage.

Key Words Wind-driven current, terrain, reclaiming, Taihu Lake