

城市浅水湖泊水质模拟研究——以昆承湖为例

曹晶晶^{1,2}, 李瑞杰^{1,2}, 秦 毅^{1,2}

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098 ; 2. 河海大学环境海洋实验室, 江苏 南京 210098)

摘要 : 采用环境流体动力学模型(EFDC)对苏州市浅水湖泊昆承湖丰水期和枯水期水质进行模拟。结果表明, 昆承湖 COD 高浓度带位于湖西部, 东南部较低, 主要受张家港河和莫城河 2 条入湖河道水体影响。湖西南部 TP 浓度较高, 莫城河河道是导致昆承湖 TP 浓度较高的主要污染源。丰水期, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 高浓度区分布在湖西南部, 莫城河河道水体对昆承湖 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度影响较大。枯水期, 全湖西北部 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较高, 主要受张家港河河道水体影响。研究结果对昆承湖的水环境管理和环境综合整治有一定的参考价值。

关键词 : EFDC ; 昆承湖 ; 水质评价

中图分类号 : X824 文献标识码 : A 文章编号 : 1004-693X(2009)04-0012-04

Simulation of water quality of shallow lakes in cities : the example of Kuncheng Lake

CAO Jing-jing^{1, 2}, LI Rui-jie^{1, 2}, QIN Yi^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. Laboratory of Marine Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : The water quality of the shallow Kuncheng Lake in Suzhou during the high water and low water periods was simulated with a numerical model called EFDC(Environmental Fluid Dynamic Computation). The results showed a high concentration zone of COD located in the western part of Kuncheng Lake, while the concentration of COD was low in the southeast. The concentration of COD was mainly affected by the influents from Zhangjiagang Stream and Mochenghe Stream. The TP concentration was high in the southwest part of Kuncheng Lake and the main pollution source was the Mochenghe Stream. The main pollutants causing the high concentration zone of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in the southwest of the lake during the high water period came from Mochenghe Stream. The concentration of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ was high in the northwest part of Kuncheng Lake, mainly due to the influent from Zhangjiagang Stream. These results can serve as a reference for the environment management and environment comprehensive regulation of Kuncheng Lake.

Key words : EFDC ; Kuncheng Lake ; water quality assessment

由于城市浅水湖泊独特的地理位置和它在城市基础设施中的地位, 使得城市浅水湖泊在城市生态环境中起着举足轻重的作用。随着大众生活水平的提高, 城市化进程的加快, 城市浅水湖泊的环境问题的治理刻不容缓^[1-4]。采用合理、有效的数值模拟方法对湖泊的水环境指标以及动力因素进行模拟十分重要。

本文采用环境流体动力学模型(Environmental Fluid Dynamics Code, 简称 EFDC)对城市浅水湖泊水

流水质进行模拟。EFDC 是大型的多维水体生态动力学模拟系统, 它可以系统地模拟水动力、水质、富营养化和沉积物输移的动态变化及其相互影响, 可以用于一维、二维和三维水环境模拟, 系统地解决水动力、水质及沉积物模型的耦合。

1 研究区域概况

昆承湖又名东湖, 为江苏省常熟市第一大湖, 太

湖流域第七大湖,位于苏州市北部,在 $31^{\circ}37' \sim 31^{\circ}33.73'N$ 、 $120^{\circ}45.95' \sim 120^{\circ}43.23'E$ 之间。昆承湖南北长 6 km,东西宽 3 ~ 4 km,现存面积 17.57 km^2 ,湖盆地形由西向东倾斜。昆承湖河道大多数由西和西北方向注入湖泊,经东和东南方向排出泄入淀山湖转入黄浦江^[5]。昆承湖兼有航运、水产养殖、调洪、灌溉、沙家浜水上旅游之用,历史上湖内水生植物茂盛,水质清澈见底,优质天然鱼类等水产品十分丰富。自 20 世纪 70 年代以来,由于不合理的渔业养殖、环湖开发、工业排污以及流域内人口增长等,昆承湖的水环境质量每况愈下,呈现出比较严重的富营养化现象。

2 模型的应用

2.1 水质参量的测定

2005 年 12 月下旬(枯水期)和 2006 年 6 月上旬(丰水期)在湖中心处布置 1 个采样点,河流入湖口周边布置了 16 个测点(图 1),每天采样 2 次的浓度平均后作为当天的浓度。同时测定相应水体的水温、pH 值、溶解氧、总磷、COD、氨氮等。

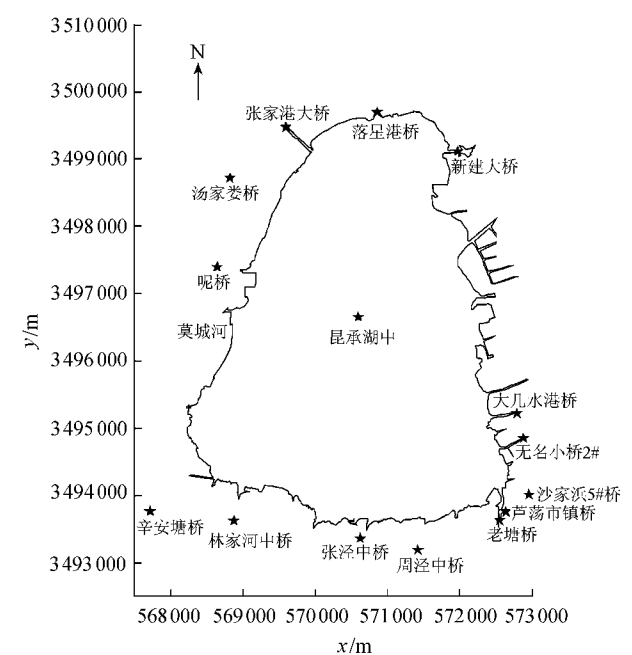


图 1 测点分布

2.2 水质模型理论^[6]及模型构造

水质变量的质量守恒控制方程

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (uC)}{\partial x} + \frac{\partial (vC)}{\partial y} + \frac{\partial (wC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S_C \quad (1)$$

公式(1)由物理输运项、平流扩散项和生态动力学项组成。求解时,生态动力学项与物理输运项脱耦,若仅对物理输运过程,其质量守恒方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (uC)}{\partial x} + \frac{\partial (vC)}{\partial y} + \frac{\partial (wC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (2)$$

若只有生态动力学过程,则方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = S_C \quad (3)$$

式中: C 为水质状态变量浓度; u, v, w 分别为 x, y 和 z 方向的速度; K_x, K_y 和 K_z 分别为 x, y 和 z 方向的扩散系数; S_C 为单位体积源汇项; K 为动力学速率 s^{-1} ; t 为时间 s 。

重点考虑主要入湖河道对昆承湖水质的影响,结合水质实测数据,水质状态变量取 COD_{Mn} 、总磷、氨氮。

a. 化学需氧量(COD)。EFDC 中 COD 表征盐水中 H_2S 浓度或淡水中 CH_4 浓度,选取 EFDC 中易降解有机碳(LOC)表征 COD。

b. 易降解有机碳(LOC)。将易降解颗粒有机碳(LPOC)和溶解有机碳(DOC)合并为一个参量。其动力学方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{LOC}}{\partial t} = & \sum_{x=c,d,g} \left(\left[F_{CD_x} + (1 - F_{CD_x}) \frac{K_{HR_x}}{K_{HR_x} + C_{DO}} \right] \right. \\ & K_{BM_x} C_{B_x} + \sum_{x=c,d,g} F_{CL} K_{PR_x} C_{B_x} + \\ & K_{ROC} C_{ROC} - K_{HR} C_{LOC} - \\ & \left. K_{Denit} C_{LOC} + \frac{\partial}{\partial z} (W_{SLP} C_{LOC}) + \frac{W_{LOC}}{V} \right) \quad (4) \end{aligned}$$

式中: F_{CD} 为无限溶解氧浓度下,藻类 x ($x=c, d, g$ 分别代表蓝绿藻、硅藻和绿藻)基础代谢中 DOC 比率; K_{HR_x} 为藻类 x 排出 DOC 时溶解氧的半饱和常数 g/m^3 ; C_{DO} 为溶解氧质量浓度 g/m^3 ; K_{BM_x} 为藻类 x 的基础代谢率 $1/d$; F_{CL} 为被摄取碳中 LOC 比率; K_{PR_x} 为藻类 x 的被捕食率; K_{ROC} 为难降解有机碳降解率; K_{HR} 为 DOC 异氧呼吸率 d ; K_{Denit} 为脱氮率; W_{SLP} 为易降解颗粒有机物沉积速度 m/d ; C_{B_x} 为藻类 x 的碳生物量 g/m^3 ; C_{ROC} 、 C_{LOC} 为分别为难降解有机碳、易降解有机碳质量浓度 g/m^3 ; W_{LOC} 为易降解有机碳外源量 g/d ; V 为体积 m^3 。

c. 总磷(TP)。包括难降解颗粒有机磷(RPOP)、易降解颗粒有机磷(LPOP)、溶解有机磷(DOP)和总磷酸盐(PO_4)。其动力学方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{RPOP}}{\partial t} = & \sum_{x=c,d,g} (F_{PR_x} K_{BM_x} + F_{PRP} K_{PR_x}) A_{PC} C_{B_x} - \\ & K_{RPOP} C_{RPOP} + \frac{\partial}{\partial z} (W_{SRP} C_{RPOP}) + \frac{W_{RPOP}}{V} \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{LPOP}}{\partial t} = & \sum_{x=c,d,g} (F_{PL_x} K_{BM_x} + F_{PLP} K_{PR_x}) A_{PC} C_{B_x} - \\ & K_{LPOP} C_{LPOP} + \frac{\partial}{\partial z} (W_{SLP} C_{LPOP}) + \frac{W_{LPOP}}{V} \quad (6) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial C_{DOP}}{\partial t} = \sum_{x=c,d,g} (F_{PD_x} K_{BM_x} + F_{PDP} K_{PR_x}) A_{PC} C_{B_x} +$$

$$K_{RPOP}C_{RPOP} + K_{LPOP}C_{LPOP} - K_{DOP}C_{DOP} + \frac{W_{DOP}}{V} \quad (7)$$

$$\frac{\partial C_{PO_{4t}}}{\partial t} = \sum_{x=c,d,g} (F_{PI_x}K_{BM_x} + F_{PIP}K_{PR_x} - K_{P_x})A_{PC}C_{B_x} + K_{DOP}C_{DOP} + \frac{W_{PO_{4t}}}{V} \quad (8)$$

式中:下标 RPOP、LPOP、DOP、PO_{4t} 分别代表难降解颗粒有机磷、易降解颗粒有机磷、溶解有机磷和总磷酸盐;C 为质量浓度, g/m³;W 为外源量, g/d;K 为降解率, 1/d。

d. 氨氮(NH₄⁺-N)。动力学方程为

$$\frac{\partial C_{NH_4}}{\partial t} = \sum_{x=c,d,g} (F_{NI_x}K_{BM_x} + F_{NIP}K_{PR_x} - A_{PN_x}K_{P_x})A_{NC_x}C_{B_x} + K_{DON}C_{DON} - K_{Nit}C_{NH_4} + \frac{W_{NH_4}}{V} \quad (9)$$

式中: C_{NH₄}、C_{DON} 为氨氮、溶解有机氮质量浓度, g/m³;W_{NH₄}为氨氮外源量, g/d;K_{Nit}为硝化率, 1/d。

2.3 模型参数取值

本文参数主要参考 Aalochiola Bay 和 Chesapeake Bay 的取值^[6-7],变动参数值见表 1。

表 1 模型参数取值				1/d
参数	取值	参数	取值	
K _{Nit}	0.050	K _{LPOP}	0.075	
K _{DON}	0.015	K _{DPOP}	0.100	

2.4 模型验证

计算区域如图 1 所示。进出昆承湖的河道较多,而有些河道的流量很小甚至是没有流量,为了简化计算量缩短计算时间,模型考虑主要几个影响较大的进出口。本文采用正交曲线网格,可以较好地贴合自然边界,提高了计算精度和计算效率。模型共布置正交曲线网格单元 4254 个,图 2 为计算水域的网格。

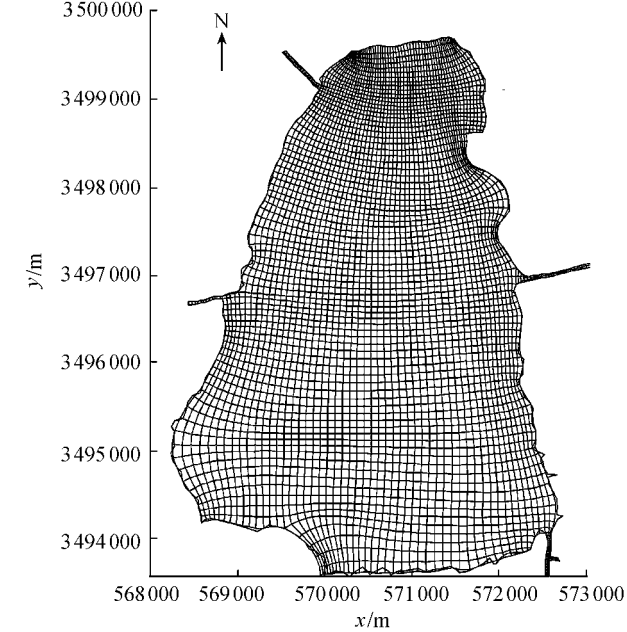
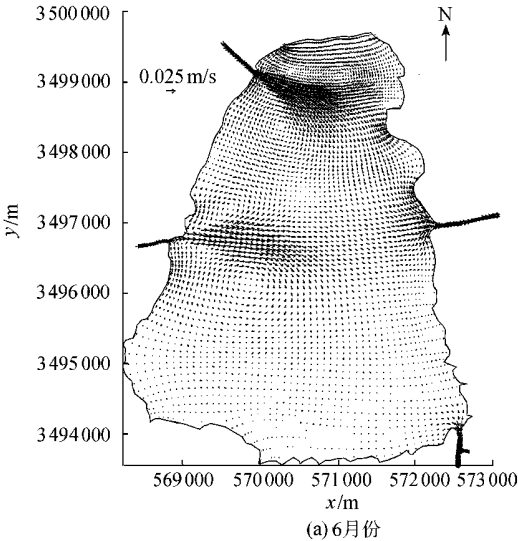


图 2 计算水域网格

2.4.1 流场验证

流速验证见表 2。

表 2 流速模型计算结果与实测结果验证

测点	丰水期			枯水期		
	计算值/ (m·s ⁻¹)	实测值/ (m·s ⁻¹)	相对误差/%	计算值/ (m·s ⁻¹)	实测值/ (m·s ⁻¹)	相对误差/%
张家港河	0.126	0.121	4.13	0.198	0.185	7.03
湖中心	0.046	0.050	8.00	0.005	0.000	—
老塘桥	0.033	0.036	8.61	0.048	0.054	12.24

为了能够清楚地显示出湖流场,流场中大于 0.025 m/s 的速度均调整为 0.025 m/s。由流场(图 3)可以看出,洪、枯季昆承湖河道大多数由西和西北方向注入湖泊,经东和东南方向排出,最主要的进口在张家港河附近,速度较大。计算结果基本能够反映出昆承湖的水动力特性。

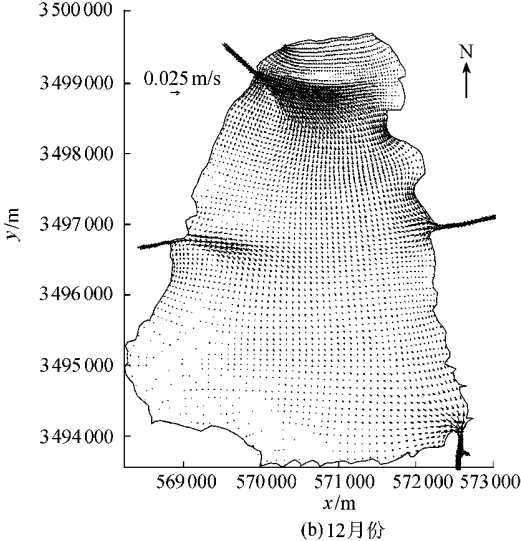


图 3 昆承湖流场图

2.4.2 水质验证

以 2005 年 12 月下旬(枯水期)和 2006 年 6 月上旬(丰水期)所测的昆承湖 COD、TP 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度为计算初始值 ,计算了枯季 5 个月、洪季 4 个月的 COD、TP 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度分布情况。COD、TP 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度验证见表 2 ~ 4。

表 3 COD 模型计算结果与实测结果验证

测点	丰水期			枯水期		
	计算值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	实测值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	相对误 差/%	计算值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	实测值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	相对误 差/%
张家港河	6.760	6.775	0.22	8.550	8.050	6.21
湖中心	7.200	6.575	9.51	7.307	7.550	3.22
老塘桥	5.807	5.950	2.40	7.253	7.750	6.41

表 4 TP 模型计算结果与实测结果验证

测点	丰水期			枯水期		
	计算值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	实测值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	相对误 差/%	计算值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	实测值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	相对误 差/%
张家港河	0.202	0.181	11.60	0.330	0.356	7.30
湖中心	0.158	0.139	13.67	0.267	0.234	14.10
老塘桥	0.138	0.133	3.76	0.251	0.261	3.83

COD、TP 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度分布如图 4。图 4(a)
(b)可以看出 ,昆承湖 COD 高浓度带位于湖西部 ,东

表 5 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 模型计算结果与实测结果验证

测点	丰水期			枯水期		
	计算值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	实测值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	相对误 差/%	计算值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	实测值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	相对误 差/%
张家港河	6.150	6.065	1.40	7.335	7.345	0.14
湖中心	4.800	4.230	13.48	7.486	6.523	14.76
老塘桥	4.602	4.050	13.63	6.847	7.022	2.49

南部较低 ,COD 主要受张家港河和莫城河 2 条入湖河道水体影响 ,湖区张家港河进口和莫城河进口附近 COD 的最高质量浓度 ,丰水期分别达 7.88 mg/L 和 9.95 mg/L ,枯水期分别达 8.65 mg/L 和 9.90 mg/L 。湖西南部 TP 质量浓度较高 ,莫城河河道是导致昆承湖 TP 较高的主要污染源 ,丰水期和枯水期其进口湖区附近 $\rho(\text{TP})$ 分别可高达 0.60 mg/L 和 0.98 mg/L (图 4(c) 及 d))。由图 4(e) 及 f) 可知 ,丰水期 ,湖西南部 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度较高 ,莫城河河道水体对昆承湖 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度影响较大 ,枯水期 ,全湖西北部 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度较高 ,昆承湖 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度主要受张家港河河道水体影响。计算结果基本反映了昆承湖水水质要素的分布特征及主要污染源。

从计算结果可以看出 ,张家港河河道和莫城河

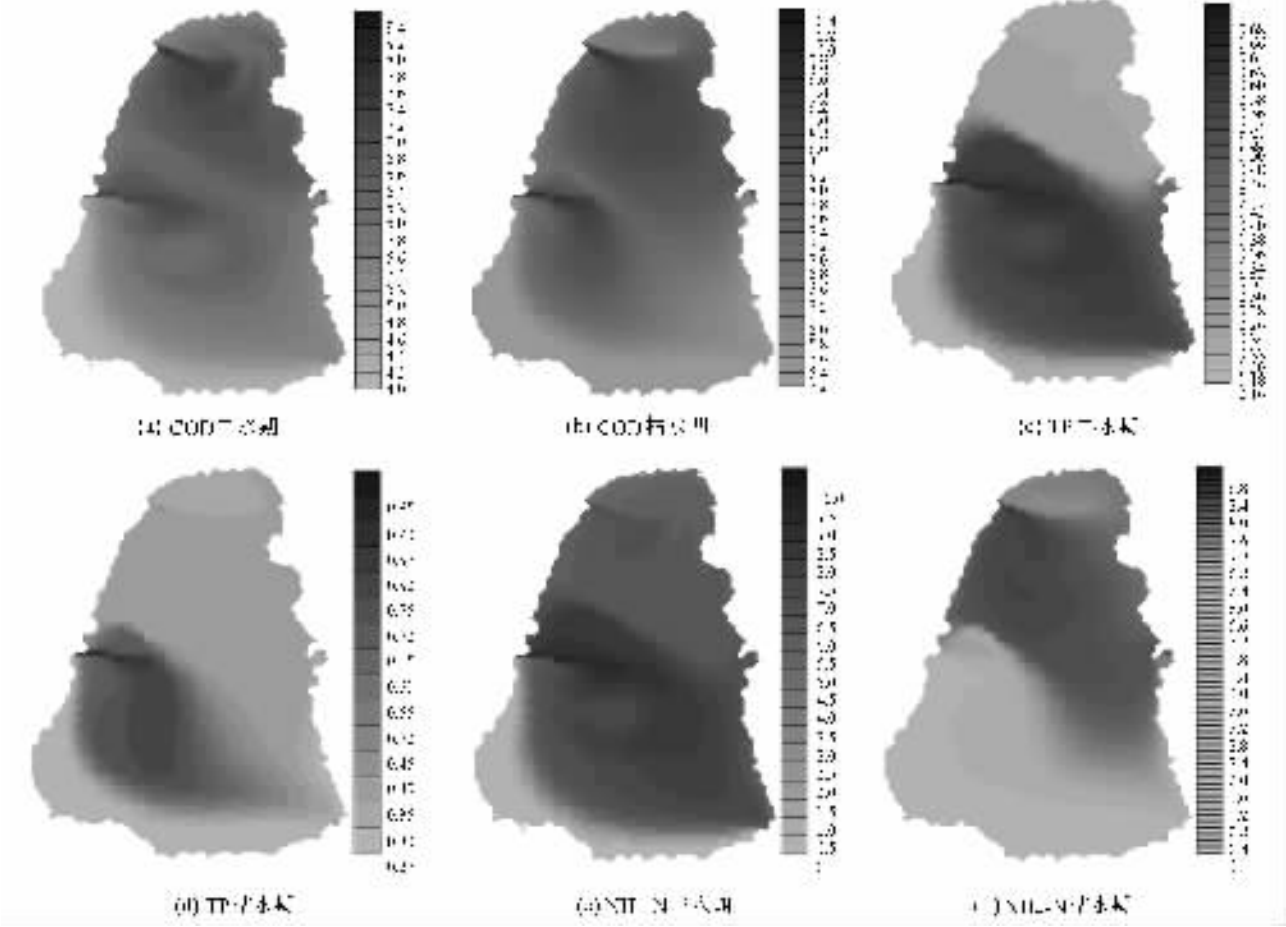


图 4 水质要素浓度分布

technologies for soils contaminated with metals-electrokinetic remediation[J]. Hazard Ind Wastes ,1998 ,33 :673-685.

[17] VAN C L. Electrokinetics :technology overview report[R]. Pittsburgh :Groundwater Remediation Technologies Analysis Centre ,1997 :1-17.

[18] 范向宇 ,王慧 ,罗启仕 . 电动生物修复中电极矩阵的优化设计[J]. 中国环境科学 ,2006 ,26(1) :34-38.

[19] ACAR Y B ,ALSHAWABKEH A N. Principles of electrokinetic remediation[J]. Environ Sci Technol ,1993 ,27(13) :2638-2647

[20] RIBEIRO A B ,MEXIA J T. A dynamic model for the electrokinetic removal of copper from a polluted soil[J]. J Hazardous Mater ,1997 ,56 :257-271.

[21] ALSHAWABKEH A N ,YEUNG A T ,BRICKA M R. Practical aspects of in-situ electrokinetic extraction[J]. J Environ Eng ,1999 ,125(1) :27-35.

[22] MAINI G ,SHARMAN A K ,SUNDERLAND G ,et al. An intergrated method incorporating sulfur-oxidizing bacteria and electrokinetics to enhance of copper from contaminated soil [J]. Environ Sci Tech ,2000 ,34(6) :1081-1087.

[23] MATTSON E D ,BOWMANL R S ,LINDGREN E R. Electrokinetic remediation using surfactant-coated ceramic casing[J]. J Environ Eng ,2000 ,126(6) :534-540.

[24] VIRKUTYTE J , SILLANPAA M , LATOSTENMAA P. Electrokinetic soil remediation-critical overview[J]. The Science of the Total Environment ,1999 ,3 :12-14.

[25] SHAPIRO A P ,PROBSTEIN R F. Removal of contaminants from saturated clay by electroosmosis[J]. Environ Sci Tech ,1993 ,27(2) :283-291.

[26] BRUELL C J ,SEGALL B A ,WALSH M T. Electroosmotic removal of gasoline hydrocarbons and TCE from clay[J]. J

Environ Eng ,1992 ,118(1) :68-83.

[27] ACAR Y B ,LI H ,GALE R J. Phenol removal from kaolinite by electrokinetics[J]. J of Geotech Eng ,1992 ,118(11) :1837-1852.

[28] CAUWENBERGHE L. Electrokinetics :technology overview report [R]. Pittsburgh : Groundwater Remediation Technologies Analysis Centre ,1997 :3 :12-14.

[29] GIACOMO M ,AJAY K S ,CHRISTOPHER J K ,et al. Electrokinetic remediation of metals and organics from historically contaminated soil [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology ,2000 ,75(8) :657-664.

[30] 张锡辉 ,王慧 ,罗启仕 . 电动力学技术在受污染地下水 and 土壤修复中新进展[J]. 水科学进展 ,2001 ,12(2) :249-255.

[31] HOS V ,ATHMER C J ,SHERIDAN P W ,et al. Intergrated in situ soil remediation thchnology the lasagna process[J]. Environ Sci Tech ,1995 ,29 :2528-2534.

[32] HOS V ,ATHMER C J ,SHERIDAN P W ,et al. The lasagan technology for in situ soil remediation 1 small field test[J]. Environ Sci Tech ,1999 ,33 :1086-1091.

[33] SAICHEK R E ,REDDY K R. Electrokinetically enhanced remediation of hydrophobic organic compounds in soils :a review[J]. Crit Rev Env Sci Tec ,2005 ,35(2) :115-192.

[34] SHE P ,LIU Z ,DING F X ,et al. Surfactant enhanced electroremediation of phenanthrene[J]. Chinese J Chem Eng ,2003 ,11 :73-78.

[35] HOS V ,ATHMER C J ,SHERIDAN P W ,et al. The Lasagan technology for in situ soil remediation 2 large field test[J]. Environ Sci tech ,1999 ,33 :1092-1099.

(收稿日期 :2008-10-18 编辑 :胡新宇)

(上接第 15 页)

道对昆承湖的污染比较严重。建议有效隔离张家港河河道和莫城河道污水对湖区主体的侵害 ,有效控制河道与湖区的水体交换。当然 ,最根本的防治措施是加强张家港河河道和莫城河道污染治理 ,改善张家港河河道和莫城河道水质 ,以实现昆承湖水质的有效改善。

3 结 论

本文采用 EFDC 对苏州市昆承湖丰水期和枯水期水流水质进行了计算模拟 ,数值解与实测值吻合较好。结果表明 ,张家港河河道和莫城河道对昆承湖的污染比较严重 ,建议加强张家港河河道和莫城河道污染治理 ,改善河道水质 ,有效控制河道与湖区的水体交换 ,以实现昆承湖水质的有效改善。研究结果对昆承湖的水环境管理和环境综合整治有一定的参考价值。

参考文献 :

[1] 安莉娜 . 城市浅水湖泊二维水量、水质耦合模型应用研究 [D]. 南京 :河海大学 ,2005.

[2] 杨丽 . 非恒定一、二维耦合水质数值模拟技术研究[J]. 水资源保护 ,2006 ,22(4) :78-81.

[3] 唐迎洲 ,阮晓红 ,王文远 . WASP5 水质模型在平原河网区的应用[J]. 水资源保护 ,2006 ,22(6) :43-46.

[4] 韩龙喜 ,陆冬 . 平原河网水流数值模拟研究展望[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2004 ,32(2) :127-130.

[5] 杨文斌 ,王国祥 ,张利民 ,等 . 常熟市昆承湖水质时空变异特征和环境压力分析[J]. 自然资源学报 ,2007 ,22(2) :185-192.

[6] CERCO C F ,COLE T M. Three-dimensional eutrophication model of Chesapeake Bay :volume I[R]. Vicksburg MS : US Army Engineer Waterways Experiment Station ,1994.

[7] PARK K , KUO A Y , SHEN J. A three-dimensional hydrodynamic-eutrophication model HEM-3D : Description of water quality and sediment process submodels[R]. VIMS VA : SRAMSOE ,1995. (收稿日期 :2008-06-24 编辑 :傅伟群)