DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2015.03.12

膜料防渗人工湖水质模拟试验研究

李改琴[1], 孙夏利[2], 李学军[3]
(1.杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100; 2.陕西省水文水资源勘测局,
陕西 西安 710068; 3.西安世博园, 陕西 西安 710024)

摘 要: 为防止西安世博园人工湖运营管理不当可能发生水质富营养化问题,选用 EFDC 水动力学模型和 WASP 水质模型对世博园 79 hm^2 膜料防渗人工湖进行了变水质、变流量等 4 种情景下的模拟试验研究。研究表明:仅用于人工湖生态需水量而不考虑湖体循环用水量的最小直接补水时,水流速度缓慢,120 d 即出现营养物质累积、湖体水质开始富营养化。循环直接补水控制在 1 m^3/s 流量时,并不能有效地改变湖内水力条件不良"死区"的污染物累积现象。最小达标补水比最小直接补水效果明显,循环达标补水效果更好。研究认为,世博园人工湖水系经济安全运行最长时间为 120 d,与此同时必须构建湖内水生态系统,提高湖体自净能力。

关键词: 防渗; 人工湖; EFDC 模型; WASP 模型
中图分类号:X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2015)03-0055-05

Experiment on water quality simulation in artificial lake of film waterproof

LI Gaiqin[1], SUN Xiali[2], LI Xuejun[3]
(1. *Yangling Vocational and Technical College, Yangling* 712100, *China*; 2. *Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Shaanxi Province, Xi'an* 710068, *China*; 3. *Xi'an Expo Park, Xi'an* 710024, *China*)

Abstract: Aimed at the problem of water eutrophication in Xi'an Expo Park artificial lake that occurs as a result of mismanagement, the paper used EFDC hydrodynamic model and WASP water quality model carried out the simulation research on 79 hectares film waterproof artificial lake system in Xi'an Expo Park under four situations such as changing water quality, discharge and so on. Experiment shows that only used for artificial lake ecological water requirements without considering the minimum directly-filling water of systemic circulation, nutrients will accumulate in 120 days because of slow water velocity and eutrophication occur in the lake. When the circulated direct replenishment is controlled in the scope of 1 m^3/s, the pollutant accumulation phenomenon can't be effectively changed at "dead zone" of hydraulic condition badness in thel lake. The effect of minimum standard water is more obvious than that of minimal direct replenishment. The effect of standard replenishment water with circulation is the best in four scenarios simulation. Research suggests that the longest economic security days is 120d in the artificial lake of Xi'an Expo Park. The water ecosystem in lake must be constructed so as to improve itself purification capacity.

Key words: impervious; artificial lake; EFDC model; WASP model

人工湖富营养化的因素很多,当湖水长期滞留或得不到有效循环,营养物质累积很容易导致湖水富营养化甚至恶化。加快人工湖水体循环速度无疑是防止水质富营养化的措施之一,但对景观湖而言增速意味着提高维护成本。既经济又安全的人工湖水系滞留天数如何确定目前尚未见此方面的研究报道[1]。利用水质模型进行水环境质量模拟和预测在国内外已有应用[2-3],比较成熟的模型有 EFDC 水动力学模型和 WASP 水质模型[4]。前者是美国国家环保署最为推崇的模型之一,用于河流、湖泊、

收稿日期:2014-11-11; **修回日期**:2015-04-26
基金项目:水利部节水型社会专题项目(200924)
作者简介:李改琴(1966-),女,陕西眉县人,副教授,主要从事高等数学教学及数学模型研究。

水库、河口、海洋和湿地等地表水系统,后者是是美国环境保护局提出的水质模型,主要用于不同环境污染决策系统中分析和预测由于自然和人为污染造成的各种水质状况。

西安世博园是 2011 西安世界园艺会博览会会址公园,园内总面积 258 hm^2,其中人工湖水域面积 79 hm^2,由 0 ~ 1.2 m 的数个小湖组成,地势南高北低,取水口位于灞河 C1 橡胶坝库区,湖水经溪流、瀑布及溢水坝等湖面后退回灞河,为确保世博园人工湖水环境长期安全运行,掌握人工湖水质变化规律,并及时采取相应的维护措施,选用 EFDC 模型和 WASP 模型对世博园人工湖进行了变水质、变流速等 4 种情景下的模拟试验研究。

1 研究路线及模型说明

西安世博园人工湖水质模拟试验研究的技术路线见图 1。

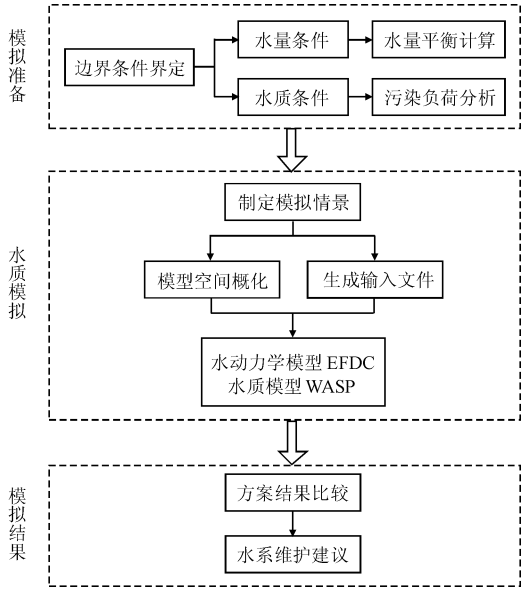

图 1 水质模拟技术路线

1.1 EFDC 模型[5-7]

EFDC 模型基本方程:

动量方程

$$\partial_t(mHu) + \partial_x(m_yHuu) + \partial_y(m_xHvu) + \partial_z(mwu) - (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hv = -m_yH\partial_x(g\zeta + p) - m_y(\partial_x h - z\partial_x H)\partial_z p + \partial_z(mH^{-1}A_v\partial_z u) + Q_u \quad (1)$$

$$\partial_t(mHv) + \partial_x(m_yHuv) + \partial_y(m_xHvv) + \partial_z(mwv) + (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hu = -m_xH\partial_y(g\zeta + p) - m_x(\partial_y h - z\partial_y H)\partial_z p + \partial_z(mH^{-1}A_v\partial_z v) + Q_v \quad (2)$$

$$\partial_t(m\zeta) + \partial_x(m_yHu) + \partial_y(m_xHv) + \partial_z(mw) = 0 \quad (3)$$

$$\partial_z p = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} = -gHb \quad (4)$$

连续方程

$$\partial_t(m\zeta) + \partial_x(m_yH\int_0^1 u\mathrm{d}z) + \partial_y(m_xH\int_0^1 v\mathrm{d}z) = 0 \quad (5)$$

状态方程

$$\rho = \rho(p,S,T) \quad (6)$$

盐度和温度输运方程

$$\partial_t(mHS) + \partial_x(m_yHuS) + \partial_y(m_xHvS) + \partial_z(mwS) = \partial_z(mH^{-1}A_b\partial_z S) + Q_S \quad (7)$$

$$\partial_t(mHT) + \partial_x(m_yHuT) + \partial_y(m_xHvT) + \partial_z(mwT) = \partial_z(mH^{-1}A_b\partial_z T) + Q_T \quad (8)$$

式中: u,v,w 为 x,y,z 3 个方向的流速; m,m_x,m_y 为雅可比矩阵,其中 $m = m_xm_y$; h 为底部高程; ζ 为水深; $H = h + \zeta$ 为总水位; ρ 为混合密度; ρ_0 为参考密度; S 为盐度; T 为温度; p 为压力; Q_u,Q_v 为盐度和温度源汇项; A_v,A_b 为垂向紊动黏滞系数和扩散系数。

联立公式(1) ~ (8),求解 u,v,w,P,ζ,ρ,S,T 变量。

1.2 WASP 模型[8-9]

WASP 模型基本方程:

污染物扩散方程

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(U_xC) - \frac{\partial}{\partial y}(U_yC) - \frac{\partial}{\partial z}(U_zC) + \frac{\partial}{\partial x}(E_x\frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(E_y\frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(E_z\frac{\partial C}{\partial z}) + S_L + S_B + S_K \quad (9)$$

BOD 方程

$$\frac{\partial C_5}{\partial t} = a_{oc}K_{1D}C_4 - K_D\Theta_D^{(T-20)}(\frac{C_6}{K_{\mathrm{BOD}} + C_6})C_5 - \frac{V_{s3}(1 - f_{D5})}{D}C_5 - \frac{5}{4}\times\frac{32}{14}K_{2D}\Theta_{2D}^{(T-20)}(\frac{K_{\mathrm{NO_3}}}{K_{\mathrm{NO_3}} + C_6})C_2 \quad (10)$$

DO 方程

$$\frac{\partial C_6}{\partial t} = k_2(C_s - C_6) - k_d\Theta_d^{(T-20)}(\frac{C_6}{K_{\mathrm{BOD}} + C_6})C_5 - \frac{64}{14}k_{12}\Theta_{12}^{(T-20)}(\frac{C_6}{K_{\mathrm{NIT}} + C_6})C_1 - \frac{S_{\mathrm{OD}}}{D}\Theta_s^{T-20} + G_{P1}(\frac{32}{12} + \frac{48}{14}\times\frac{14}{12}(1 - P_{\mathrm{NH_3}}))C_4 - \frac{32}{12}k_{1R}\Theta_{1R}^{(T-20)}C_4 \quad (11)$$

$$\frac{\partial(C_4 a_{nc})}{\partial t} = G_{p1} a_{nc} C_4 - D_{p1} a_{nc} C_4 - \frac{v_{s4}}{D} a_{nc} C_4 \tag{12}$$

$$\frac{\partial C_7}{\partial t} = D_{p1} a_{nc} f_{on} C_4 - k_{71} \Theta_{71}^{T-20} \left(\frac{C_4}{K_{mpc} + C_4}\right) C_7 - \frac{v_{s3}(1 - f_{D7})}{D} C_7 \tag{13}$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = D_{p1} a_{nc} (1 - f_{on}) C_4 + k_{71} \Theta_{71}^{T-20} \left(\frac{C_4}{K_{mpc} + C_4}\right) C_7 - G_{p1} a_{nc} P_{NH_3} C_4 - k_{12} \Theta_{12}^{T-20} \left(\frac{C_6}{K_{NIT} + C_6}\right) C_1 \tag{14}$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = k_{12} \Theta_{12}^{T-20} \left(\frac{C_6}{K_{NIT} + C_6}\right) C_1 - G_{p1} a_{nc} (1 - P_{NH_3}) C_4 - k_{2D} \Theta_{2D}^{T-20} \left(\frac{K_{NO_3}}{K_{NO_3} + C_4}\right) C_2 \tag{15}$$

$$\frac{\partial C_8}{\partial t} = D_{p1} a_{nc} f_{op} C_4 - k_{83} \Theta_{83}^{T-20} \left(\frac{C_4}{K_{mpc} + C_4}\right) C_8 - \frac{v_{s3}(1 - f_{D8})}{D} C_8 \tag{16}$$

$$\frac{\partial C_3}{\partial t} = D_{p1} a_{nc} (1 - f_{op}) C_4 + k_{83} \Theta_{83}^{T-20} \left(\frac{C_4}{K_{mpc} + C_4}\right) C_8 - G_{p1} a_{pc} C_4 \tag{17}$$

式中: C 为水质浓度; t 为时间; U_x, U_y, U_z 为三维方向流速; E_x, E_y, E_z 为三维方向扩散系数; S_L 为点源和非点源负荷; S_B 为边界负荷; S_K 为水环境系统负荷; k 为降解系数; K 为半饱和常数; T 为温度; Θ 为温度校正系数; S_{OD} 为沉降需氧量; v 为沉降速度; D 为水深; f 为有机质溶解分数; a 为元素比; G, D 为浮游植物生长速率和死亡呼吸速率; P_{NH_3} 为植物生长N源中来自 NH_3 的分数;下标1 ~ 8分别代表氨氮、硝氮、无机氮、浮游植物、含碳生化需氧量、溶解氧、有机氮、有机磷。

2　边界条件及情景设置

依据人工湖几何形状,并考虑水系面积、水文特征等具体情况,将水系网格化成 438 个 50 m × 50 m 的单元格。考虑到西安世博园人工湖水深 0 ~ 1.2 m 为浅水水系,垂直方向不再分层。

2.1　自然条件

西安世博园位于灞河下游阶地,海拔 393.9 ~ 376.2 m,区域地层主要为第四纪全新世冲积亚粘土、亚砂土、砂及砂砾卵石组成,总厚 60 ~ 70 m。区域属暖温带半湿润大陆性气候,多年平均气温 13.3℃,最大冻深 45 cm,多年平均降水量 570.5 mm,蒸发量 904.7 mm,地下水埋深 25.7 ~ 27.5 m。

2.2　水量条件

包括人工湖水面降雨、水面蒸发、湖底渗漏、绿地和道路喷洒用水,补水关系式为:

$$Q_{补} = Q_{蒸} + Q_{渗} + Q_{绿} + Q_{路} - Q_{降} - Q_{径} \tag{18}$$

式中: $Q_{补}$ 为最小补水量; $Q_{降}$ 为水面降雨量; $Q_{径}$ 为地表径流量; $Q_{蒸}$ 为水面蒸发量; $Q_{渗}$ 为湖底渗漏量; $Q_{绿}$ 为绿地灌水用水量; $Q_{路}$ 为道路喷洒用水量。

2.3　水质条件

人工湖以灞河水为补充水源。2008 年灞河 C1 橡胶坝取水口、园区地表径流检测指标见表 1。

表 1　水质检测指标　　mg/L

位置	DO	COD_{Mn}	NH_3 - N	BOD_5	石油类	TN	TP
C1 橡胶坝	8.26	2.42	0.40	1.46	0.41	4.28	0.22
园区地表径流	5.23	2.80	0.39			3.40	0.12
Ⅲ类水质指标[10]	≥5	≤6	≤1.0	≤4	≤0.05	≤1.0	≤0.05

2.4　情景设置

(1)最小直接补水:在水量平衡计算中只考虑蒸发、渗漏、绿地灌溉和道路喷洒用水,不考虑循环用水,水质为灞河 C1 橡胶坝取水口多年平均监测值。

(2)最小达标补水:水量与情景一相同,水质为地表水Ⅲ类标准指标。

(3)循环直接补水:供水流量为 1 m^3/s,水质与情景一相同。

(4)循环达标补水:供水流量为 1 m^3/s,水质为地表水Ⅲ类标准指标。

3　结果与分析

3.1　最小直接补水

(1)COD 浓度:补水口附近 COD 浓度迅速达到Ⅱ类,其余大部分湖体由于湖面蒸发 COD 浓度略超过Ⅲ类,30 d 湖体自身降解一半湖体 COD 浓度达到Ⅱ

类,120 d 全部湖体 COD 浓度达Ⅱ类并维持此水平。

(2)TP 浓度:由于灞河 TP 浓度为劣Ⅴ类,所以在补水口附近 TP 浓度随着补水迅速达到劣Ⅴ类,见图 2(a),30 d 时 1/2 湖体 TP 浓度达到Ⅴ类水平,90 d 绝大部分湖体 TP 浓度达到劣Ⅴ类,180 d 湖体 TP 浓度均达到劣Ⅴ类,湖体浓度最大值出现在湖内水力条件不良区域。

(3)TN 浓度:由于灞河 TN 浓度超过Ⅴ类 2 倍标准,补水口附近 TN 浓度随着补水迅速达到并超过Ⅴ类 2 倍水平,见图 2(b),湖体 TN 浓度随着补水而升高,30 d 时 1/2 湖体 TN 浓度达到劣Ⅴ类,90 d 绝大部分湖体 TN 浓度达到并超过Ⅴ类 2 倍水平。

(4)NH_3 - N 浓度:在补水口附近 NH_3 - N 浓度处于Ⅱ类,由于地面径流和湖面蒸发的影响,90 d 湖内大部分水体 NH_3 - N 浓度达到Ⅴ类,NH_3 - N 浓度变化呈现周期性,180 d 湖内大部分水体 NH_3 - N浓度呈现好转趋势,360 d 时 NH_3 - N 浓度再次回到 90 d 水平。

3.2 最小达标补水

(1)COD 浓度:在补水口附近 COD 浓度迅速达到Ⅱ类,随着湖面蒸发 COD 浓度略超过Ⅲ类,经 30 d 降解 1/2 湖体 COD 浓度达到Ⅱ类,90 d 绝大部分湖体 COD 浓度达到Ⅱ类并维持此水平。

(2)TP 浓度:由于地表径流和湖面蒸发,30 d 时除补水口附近 TP 浓度仍保持Ⅲ类外,其余大部分湖体 TP 浓度均达到Ⅳ类,120 d 湖体水力条件不良区域出现Ⅴ类并逐渐扩大,至 360 d 时湖体 TP 浓度又全部回到Ⅳ类水平。

(3)TN 浓度:除部分湖体 TN 浓度Ⅳ类外,在补水口附近 TN 浓度仍保持Ⅲ类,120d 湖体水力条件不良区域 TN 浓度出现Ⅴ类,240d 时 TN 浓度逐渐扩大,个别区域出现劣Ⅴ类,至 360 d 时 TN 浓度回到 30d 水平。

(4)NH_3 - N 浓度:由于灞河 NH_3 - N 浓度优于湖体初始水平,补水口附近 NH_3 - N 浓度迅速达到Ⅱ类,90 d 时 1/3 湖体 NH_3 - N 浓度达到Ⅱ类,120 d 时绝大部分湖体达到Ⅱ类,NH_3 - N 浓度变化呈周期性,至 360 d 时 NH_3 - N 浓度回至到 60 d 水平。

3.3 循环直接补水

(1)COD 浓度:补水口附近 COD 浓度迅速达到Ⅱ类,其余湖体由于湖面蒸发 COD 浓度略超过Ⅲ类,流量增大水流交换能力明显提高,经 15 d 降解全部湖体 COD 浓度均达Ⅱ类并维持此水平。

(2)TP 浓度:由于灞河 TP 浓度为劣Ⅴ类水平,补水口附近 TP 浓度随着补水的进行迅速达到劣Ⅴ类,30d 绝大部分湖体的 TP 浓度达到劣Ⅴ类,90 d 湖体水力条件不良区域 TP 浓度出现Ⅴ类 2 倍水平,这种状况一直持续到 360 d。

(3)TN 浓度:由于灞河 TN 浓度为超过Ⅴ类标准 2 倍,补水口附近 TN 浓度随着补水的进行而升高,15 d 绝大部分湖体的 TN 浓度超过Ⅴ类 2 倍水平,45 d 全部湖体 TN 浓度超过Ⅴ类 2 倍并维护此水平。

(4)NH_3 - N 浓度:由于灞河 NH_3 - N 浓度优于湖体的初始水平,补水口附近 NH_3 - N 浓度迅速达到Ⅱ类水平,60 d 在湖体水力条件不良区域NH_3 - N 浓度出现Ⅳ类,90 d 出现Ⅴ类,NH_3 - N 浓度变化呈现周期性,至 360 d 时 NH_3 - N 浓度又回到 60 d 水平。

3.4 循环达标补水

(1)COD 浓度:补水口附近 COD 浓度迅速达到Ⅱ类,其余湖体由于湖面蒸发 COD 浓度略超过Ⅲ类,经 15 d 降解全部湖体 COD 浓度达Ⅱ类并维持此水平。

(2)TP 浓度:除补水口附近 TP 浓度仍保持Ⅲ类水平外,其余大部分湖体 TP 浓度均达到Ⅳ类,180 d 湖体水力条件不良区域 TP 浓度出现Ⅴ类水平。

(3)TN 浓度:60 d 湖体水力条件不良区域 TN 浓度出现Ⅳ类,180 d 出现Ⅴ类和劣Ⅴ类,至 360 d 时 TN 浓度回到 60 d 水平。

(4)NH_3 - N 浓度:由于灞河 NH_3 - N 浓度优于湖体的初始水平,补水口附近 NH_3 - N 浓度迅速达到Ⅱ类,15 d 除部分水力条件不好的区域外绝大部分湖体 NH_3 - N 浓度均达到Ⅱ类,240 d 不良区域由于污染物累积 NH_3 - N 浓度开始出现Ⅳ类,NH_3 - N 浓度变化呈周期性,至 360 d 时又回到 15 d 水平。

3.5 溶解氧 DO 模拟

4 种情景下湖体平均 DO 浓度模拟结果见图 3。由于灞河 DO 浓度高于湖体初始水平,随着补水湖体的 DO 浓度逐渐升高,在 60 d 时达到最大值。由于膜料防渗人工湖的复氧能力较天然河道差,随着补水的进行湖体 DO 难度不断消耗并逐渐降低,到 300 d 时达到最低值,之后耗氧反应的速率有所降低,DO 浓度有小幅上升趋势。

比较 4 种情景模拟结果发现,在最小直接补水中,DO 浓度的变化幅度比较大,在补水初期高于循环补水,但随着补水的进行,DO 的浓度 45 d 前低于循环直接补水,90 d 后低于最小达标补水,120 d 时

出现劣 V 类水平。

在循环直接补水中,由于补水量加大且灞河补充水源的 DO 浓度较高,所以初期 DO 浓度高于最小补水,DO 浓度的变化幅度不大,湖体平均浓度全年控制在Ⅲ~Ⅳ类水平,214 d 时局部浓度出现劣 V 类。循环达标补水模拟结果优于循环直接补水情景。

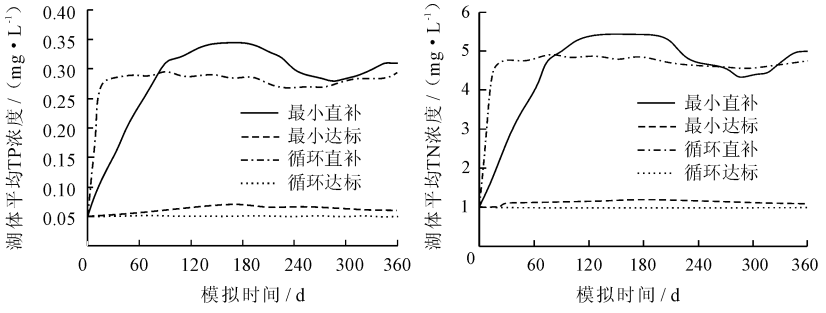

图 2　4 种情景湖体 TP、TN 模拟结果

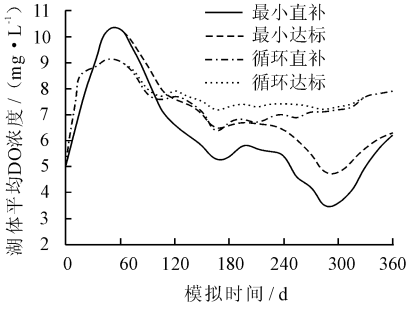

图 3　4 种情景湖体 DO 模拟结果

4　结　语

(1)在最小直接补水中,由于灞河水源 TP 和 TN 浓度远高于湖体初始水平,因此湖体 TP 和 TN 浓度随补水的进行而升高。90 d 时绝大部分湖体 TP、TN 浓度达到劣Ⅴ类,120 d 时 DO 浓度出现劣Ⅴ类,所以 120 d 是世博园人工湖水系最长经济安全滞留天数。

(2)在最小达标补水中,湖体 TP 和 TN 浓度比最小直补有大的改善。但由于补水量小,水流速度缓慢,120 d 时在湖体水力条件不良区域 TP 和 TN 浓度依然出现Ⅴ类水平。

(3)在循环直接补水中,湖体水系的流动性增强,TP 和 TN 浓度随补水的扩散而升高,扩散速度在 90 d 前大于最小直接补水,214 d 时 DO 浓度出现劣Ⅴ类水平。可见 1 m^3/s 的循环补水量并没有改变湖内水力条件不良“死区”污染物累积现象,相反,当水质较差时加速富营养物质浓度的扩散速度。

(4)在循环达标补水中,由于补水水质和水量均得以提高,所以湖体的水质明显优于前三种情景。但提升补水水质,加快补水流量,就景观湖而言无疑增加运行维护成本。模拟研究认为,世博园人工湖水系经济安全的维护方案是在“静态”运行 120 d 的同时,构建湖内水生态系统,提高湖体自净能力。

参考文献:

[1] 王建平,苏保林,贾海峰,等. 密云水库及其流域营养物集成模拟的模型体系研究[J]. 环境科学,2006,27(7):1286-1291.

[2] 于顺东. WASP 水质模型应用与 DO 模型评价[D]. 天津:天津大学,2007.

[3] 彭 森. 基于 WASP 模型的不确定性水质模型研究[D]. 天津:天津大学,2010.

[4] WU Guozheng, XU Zongxue. Prediction of algal blooming using EFDC model:Case study in the Daoxiang Lake[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(6): 1245-1252.

[5] 刘夏明,李俊清,豆小敏,等. EFDC 模型在河口水环境模拟中的应用及进展[J]. 环境科学与技术,2011,34(Z1):136-140+360.

[6] 周贤宾,吴 建,詹中英,等. EFDC 模型在饮用水源保护区划分中的应用研究——以杭嘉湖地区某水厂为例[J]. 环境科学导刊,2009,28(2): 30-32.

[7] 金 梦. 基于 WASP 水质模型的水环境容量计算[D]. 沈阳:辽宁大学,2011.

[8] 郭素铭. EFDC 模型在水动力环境影响评价中的应用[J]. 海峡科学,2010(6):37-42.

[9] 陈美丹,姚 琪,徐爱兰. WASP 水质模型及其研究进展[J]. 水利科技与经济,2006,12(7):420-422+426.

[10] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局. GB3838-2002 地表水环境质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.