

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0157

杨芳, 李建, 裴中平, 等. 鄱阳湖九江工业用水区纳污能力研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 80-88, 129. YANG F, LI J, PEI Z P, et al. Assimilative capacity of Jiujiang industrial water function zone beside Poyang Lake using analytical method and numerical method[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 80-88, 129. (in Chinese)

鄱阳湖九江工业用水区纳污能力研究

杨芳, 李建, 裴中平, 周琴

(长江水资源保护科学研究所, 武汉 430051)

摘要:水功能区水域纳污能力是污染物入河湖总量控制的基础, 当前水域纳污能力计算较多使用公式的解析解法, 计算结果较为粗略。选取鄱阳湖九江工业用水区作为研究对象, 采用解析解法和数值解法相结合的方法对鄱阳湖九江工业用水区纳污能力进行联合求解, 利用解析解法计算水域纳污能力初值, 再以此作为模型启动条件, 通过数值模型对解析解法获得的初始值进行试算检验和优化。计算结果表明, 鄱阳湖九江工业用水区的最优水域纳污能力COD为9 776 t/a, 氨氮为142 t/a。研究统筹考虑了河道形态、岸边流速变化、丰水期长江江水顶托和倒灌等因素, 弥补了解析解法的局限性, 结果更具合理性, 可为鄱阳湖九江工业用水区水质管理和限制排污总量控制提供参考。

关键词: 水域纳污能力; 解析解法; 数值解法; 鄱阳湖; 工业用水区

中图分类号: X52 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Assimilative capacity of Jiujiang industrial water function zone beside Poyang Lake using analytical method and numerical method

YANG Fang, LI Jian, PEI Zhongping, ZHOU Qin

(Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, China)

Abstract: The assimilative capacity of a water function zone is the basis for gross control of pollutants discharge. At present, the capacity is commonly calculated by analytical method, but the calculation results are not accurate. In this research, we took Jiujiang industrial water function zone beside Poyang Lake as the object of research, and calculated its assimilative capacity. The analytical method was used to calculate the initial value, and the numerical method was used to optimize the initial value. The calculation results showed that the optimal assimilative capacity of Jiujiang industrial water function zone beside Poyang Lake for COD is 9 776 t/a, and that for ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) is 142 t/a. This study takes into account such factors as the river morphology, the change of inshore velocity, and the effects of characteristic hydrological conditions. It can make up for the limitations of the analytical method and generate more reasonable results. It can provide a reference for water pollutants gross control in Jiujiang industrial water function zone beside Poyang Lake.

Key words: assimilative capacity of water bodies; analytical method; numerical method; Poyang Lake; industrial water function zone

收稿日期: 2018-07-09 修回日期: 2018-10-08 网络出版时间: 2018-10-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181019.1635.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0404502); 水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07108001)

Funds: National Key Research and Development Program of China(2017YFC0404502); Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (2017ZX07108001)

作者简介: 杨芳(1981-), 女, 湖北咸宁人, 高级工程师, 博士, 主要从事水资源保护方面研究。E-mail: 10422813@qq.com

通讯作者: 李建(1985-), 男, 山东临沂人, 高级工程师, 博士, 主要从事水资源保护方面研究。E-mail: lijian2750@foxmail.com

水域纳污能力计算是江河湖泊限制排污总量控制的基础。《中国水利百科全书》(2004年)环境水利分册将水域纳污能力定义为水域能持续发挥给定功能而接纳的最大污染物负荷量,即根据规定的水文概率或经调节的河道流量,确定在自净作用下,保证达到功能区水质要求所允许的污染物排放量。《水域纳污能力计算规程》(GB/T 25173-2010)明确水域纳污能力是指,针对江河、湖泊、水库、运河、渠道等已划定水功能区的地表水域,在设计水文条件下,某种污染物满足水功能区水质目标要求所能容纳的该污染物的最大数量。

国外常用“环境容量”、“最大容许纳污量”和“水体容许排污水平”等概念来描述水域纳污能力,并将其融合在总量控制研究中^[1]。20世纪60年代,日本最早开始水体允许污染物负荷量估算研究,提出“环境容量”概念^[2]。随后欧美国家相继开展环境容量研究,通常将水环境容量计算和污染物总量分配在同一过程中实现^[3],早期较多采用公式法、线性规划等确定性方法进行研究^[4-5],未考虑河流水文、水动力及水质条件的动态变化,之后随机理论被引入水环境容量研究,先后提出了概率稀释模型、随机水质优化模型等不确定方法^[6-8],当前研究较多关注于河流流量、排污流量、排污浓度、河流水质背景浓度等因子不确定性对污染负荷分配的影响。

国内对于流域水域纳污能力的研究经历了由浓度控制到目标总量控制再到容量总量控制的发展历程,例如,太湖流域已将容量总量控制运用于重点控制区的污染防治。目前针对水域纳污能力的研究方法较多,国内学者改进了概率稀释模型法^[9],提出了模型试错法^[10-12]和基于盲数理论的未确知数学法^[13]等计算方法,但在管理实践中仍以公式法^[14]、线性规划法^[15]等确定性方法为主,其主要原因是国内水环境管理体制、水污染现状与国外存在较大差异,且多数地区缺乏长系列水质监测数据^[16-17],国外先进方法在国内的适用条件尚不够成熟。

当前我国江河湖泊水功能区管理中纳污能力计算较多使用公式的解析解法,该方法需要将计算河段概化为理想的矩形河段,同时忽略了横向流速、地形变化等因素,计算结果较为粗略。本文采用解析解法和数值解法相结合的方法对鄱阳湖九江工业用水区纳污能力进行联合求解,综合考虑河道地形、岸边流速变化、丰水期长江江水顶托和倒灌、污水排放量和污染物排放浓度的组合关系等因素,计算方法可为流域水功能区计算提供借鉴。

1 研究区域概况

鄱阳湖九江工业用水区,范围为九江化纤厂铁路至蛤蟆石沿岸长5 km,宽1 km水域,面积约7.4 km²,水质管理目标为Ⅰ类。鄱阳湖九江工业用水区范围会随湖区水位变化而变化,丰水期鄱阳湖湖面宽阔,范围为九江化纤厂铁路至蛤蟆石沿岸长5 km,宽1 km,面积约7.4 km²的水域;枯水期当星子-湖口水面宽度不足1 km时,范围为九江化纤厂铁路至蛤蟆石沿岸长5 km的整个河道。因此枯水期研究区域可按照河流型水体进行纳污能力计算。鄱阳湖九江开发利用区外围水域均被划为鄱阳湖湖区保留区,水质管理目标为Ⅰ类。

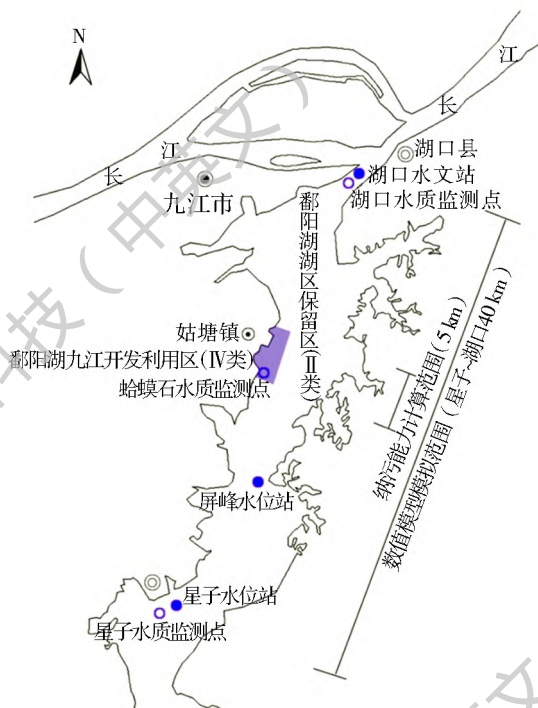


图1 研究区域概况

Fig. 1 Research area overview

2 研究方法

2.1 平面二维水动力水质基本方程

(1) 水动力方程。

描述天然水体运动的控制方程为圣维南(Saint Venant)方程组,由反映质量守恒的连续方程和反映动量守恒的运动方程组成^[18]。

连续方程

$$\frac{\partial Q_z}{\partial t} + \frac{\partial (QH_u)}{\partial x} + \frac{\partial (QH_v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial (QH_u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (QH_{uu}) + \frac{\partial}{\partial y} (QH_{uv}) =$$

$$-\rho g H \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(H \nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(H \nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y}) - \tau_{ux} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho H v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho H uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho H vv) = -\rho g H \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(H \nu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(H \nu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y}) - \tau_{vy} \quad (3)$$

式中: u 、 v 分别为 x 、 y 方向的流速分量 (m/s); t 为时间 (s); ρ 为水体密度 (kg/m^3); ν_{eff} 为有效黏性系数; Z 为水面高程 (m); H 为水深 (m); τ_{ux} 、 τ_{vy} 分别为 x 、 y 方向的阻力系数。

(2) 可降解污染物二维对流扩散模型方程。

根据质量守恒原理, 考虑对流、扩散、降解等项, 得到可降解污染物二维扩散方程形式^[19-20]

$$\frac{\partial CH}{\partial t} + \frac{\partial uCH}{\partial x} + \frac{\partial vCH}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(E_x \frac{\partial CH}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(E_y \frac{\partial CH}{\partial y}) + \sum S_i \quad (4)$$

式中: C 为水中污染物浓度 (mg/L); E_x 、 E_y 分别为纵向弥散系数和横向扩散系数 (m^2/s); S_i 为源项污染物排放负荷, 期间他符号意义同前。

水域纳污能力的计算需要求解对流扩散方程, 对流扩散方程的解可分为解析解和数值解^[21-22]。解析解法是利用概化的水力学公式, 由微积分技巧求得特定条件下的方程解。数值解法一般将方程的微分改为差分, 再用传统的代数方法将原方程式改写成另一方便求解的形式, 这时的求解步骤就是将一独立变量带入, 求得相依变量的近似解。

2.2 方程的解析解法

对于顺直河段, 水深变化不大, 忽略横向流速、纵向离散作用及源汇项, 且假定污染物排放不随时间变化时, 即 $E_x = 0$ 。令 $\sum S_i = -KC$, 式(4)二维对流扩散方程可简化为

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y}(E_y \frac{\partial c}{\partial y}) - KC \quad (5)$$

式中: C 为污染物浓度 (mg/L); K 为污染物的降解系数 (L/s); E_y 为污染物的横向扩散系数 (m^2/s); x 为沿河段的纵向距离 (m); y 为计算点到岸边的横向距离 (m); K 为污染物综合衰减系数 (L/s)。

污染物入河速率为 m (单位为 g/s) 的点源在岸边连续恒定排放, 横断面可概化为矩形的河段, 水深为 h , x 方向流速为 u , 水域代表的污染物浓度相应的解析解公式^[23] 为

$$C(x, y) = [C_0 + \frac{m}{uh \sqrt{\pi E_y x / u}} \exp(-\frac{u}{4x} \cdot \frac{y^2}{E_y})] \cdot \exp(-K \frac{x}{u}) \quad (6)$$

根据河流二维对流扩散方程的解析解公式, 当

以岸边污染物浓度作为下游控制断面的控制浓度时, 即 $y = 0$, 则岸边污染物浓度计算公式为

$$c(x, 0) = [c_0 + \frac{m}{uh \sqrt{\pi E_y x / u}}] \exp(1 - K \frac{x}{u}) \quad (7)$$

当入河排污口位于(或概化至)计算河段的中部时, 即 $x = L/2$ 时, 可由公式(7)反推出水功能区水域纳污能力计算公式:

$$M = \left[\frac{c_s - c_0 \exp(-K \frac{L}{u})}{\exp(-K \frac{L}{2u})} \right] \cdot h \cdot \sqrt{\pi E_y u L / 2} \quad (8)$$

式中: M 为计算水域纳污能力 (g/s); C_s 为水功能区水质管理目标浓度 (mg/L); C_0 为计算水域污染物背景浓度 (mg/L); L 为计算水域(河段)长度 (m)。

2.3 方程的数值解法

利用有限体积法进行数值求解, 首先对平面二维水动力水质数学模型方程(1)至(4)进行数值离散, 采用强隐式算法(SIP)对离散的代数方程组进行数值求解。为利于数值计算, 将平面二维水动力水质数学模型方程(1)至(4)改写为如下统一形式:

$$(a^u)_x + (u^a)_x + (v^a)_y + (w^a)_z = (a^x)_x + (a^y)_y + (a^z)_z + S^a \quad (9)$$

式中: a^{\cdot} 分别代表式(1)至式(4)中 u 、 v 、 c , 式(9)分别代表式(1)至(4)描述的 x 和 y 方向动量方程、连续方程和水质方程。

采用非正交非交错网格, 在空体内, 按照有限控制体积方法, 对流项采用迎风格式处理, 对方程(9)进行数值离散, 得到离散的代数方程组为

$$a_p^a - \sum_{nb} a_{nb}^a = a_{nb}^a - a_p^a \quad (10)$$

式中: a_p 、 a_{nb} 均为系数。

采用 SIMPLE 正交算法, 获得自由表面校正方程和速度修正方程, 可以应用 SIP 方法进行快速求解。对于闭合边界条件, 沿着闭合边界(陆地边界), 所有垂直于边界流动的变量必须为 0; 对于开边界条件, 可以指定流量过程或者水位过程; 对于干湿边界条件, 基于 Zhao^[24] 和 Sleigh^[25] 的处理方式。当深度较小时, 该问题可以被重新表述, 通过将动量通量设置为零以及只考虑质量通量来实现。只有当深度足够小时, 计算不考虑该网格单元。

3 计算步骤与结果

综合利用两种方法进行水域纳污能力的计算, 通过解析解法求得水功能区纳污能力的初始值, 再以此作为数值模型起算条件, 利用数值解法对初始值进行试算检验和优化。

3.1 设计水文条件与计算参数

结合鄱阳湖“高水是湖、低水似河，洪水一片、枯水一线”的鲜明特点，采用湖口水文站 90% 最枯月均流量作为设计水文条件。由于鄱阳湖在汛期存在江水倒灌情况，在统计最枯月均流量时排除了江水倒灌情况下的最枯月流量。对 1950-2015 年湖口水文站流量资料进行统计，用适线法获得湖口水文站 90% 最枯月均流量为 $632 \text{ m}^3/\text{s}$ ，对应的多年平均水位为 6.76 m (吴淞高程)。

蛤蟆石断面位于鄱阳湖九江工业用水区内，距离功能区上游约 500 m ，功能区上游断面至蛤蟆石间没有排污口，因此选取蛤蟆石断面水质作为功能区背景浓度控制断面。根据近年 (2014-2017 年)

蛤蟆石断面的水质监测结果，枯水期 (11 月至次年 2 月) COD 平均浓度 10.17 mg/L ，氨氮 0.46 mg/L ，以此作为数值模型模拟的背景浓度。

尽管鄱阳湖九江工业用水区水质管理目标为 0 类，但其下游水功能区水域——鄱阳湖湖区保留区的水功能区水质目标为 0 类，因此鄱阳湖九江工业用水区下断面必须以 0 类水质目标严格控制，即 COD 取 15 mg/L ，氨氮取 0.5 mg/L 。

3.2 基于解析解法的纳污能力初值计算

根据水域纳污能力解析解计算公式 (8)，得到在设计水文条件下鄱阳湖九江工业用水区水域纳污能力的初始值，COD 为 8217.6 t/a ，氨氮为 85.25 t/a (见表 1)。

表 1 鄱阳湖九江工业用水区水域纳污能力计算结果 (解析解法)

Tab. 1 Assimilative capacity of Jiujiang industrial water function zone beside Poyang Lake by analytical method

指标	控制目标	目标浓度 C_s /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	背景浓度 C_0 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	横向扩散系数 E_y /($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	综合衰减系数 K /($1 \cdot \text{d}^{-1}$)	水深 H /m	岸边流速 v /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	水功能区长度 L /m	纳污能力 /($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)
COD	0 类	15	10.17	0.28	0.12	2.8	0.13	5000	8217.6
氨氮	0 类	0.5	0.46	0.28	0.08	2.8	0.13	5000	85.25

3.3 基于数值解法的纳污能力终值试算

3.3.1 数值模型的建立与验证

采用 MIKE21 模型进行数值计算。鄱阳湖九江工业用水区下游为湖口水文站，上游为星子水位站，模型模拟范围选定为星子-湖口段，长 40 km 。

采用三角形结合四边形网格的方式对鄱阳湖星子-湖口段 40 km 计算水域 (1:10000 水下地

形，鄱阳湖水文局提供) 进行剖分。其中，鄱阳湖九江工业用水区河段顺直，采用四边形网格，其他非顺直河段采用三角形网格以适应复杂的湖泊岸线边界。四边形网格长 $50 \sim 60 \text{ m}$ ，宽 $20 \sim 30 \text{ m}$ ，三角形最大面积 10000 m^2 ，采用邻近点法对网格节点高程进行插值，形成水动力水质模型的计算网格 (图 2)。

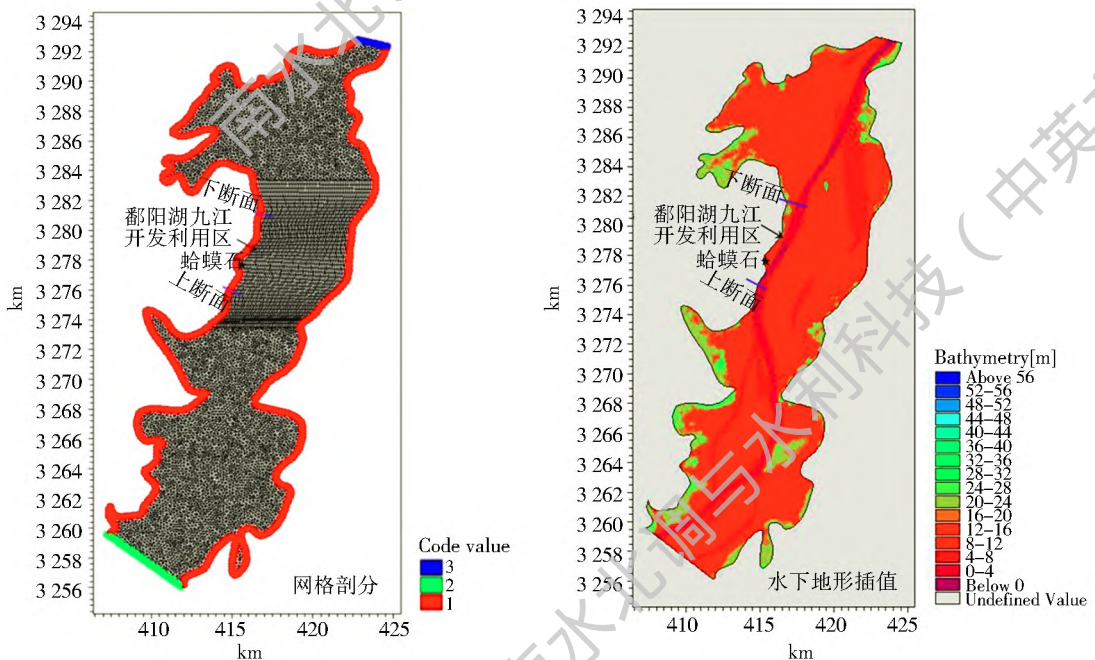


图 2 计算网格剖分和水下地形插值

Fig. 2 Mesh generation and bathymetry interpolation

水动力模型和对流扩散模型参数采用经验公式、以往研究成果和模型试算等多种方式综合确定,各参数取值见表 2 所示。

表 2 数值模型计算参数

Tab. 2 Parameters of numerical model

模型参数	糙率 n		综合衰减系数 $K / (L \cdot d^{-1})$		横向扩散系数 $E_y / (m^2 \cdot s^{-1})$
	岸滩	河道	COD	氨氮	
取值	1/50	1/30	0.12	0.08	0.28

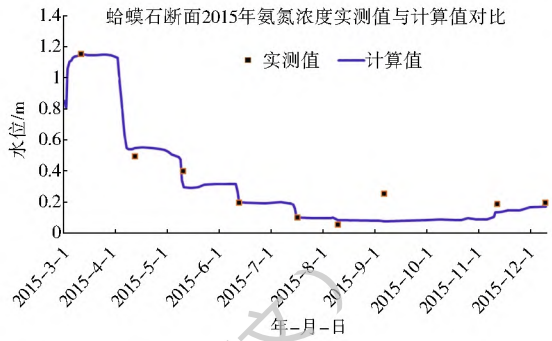
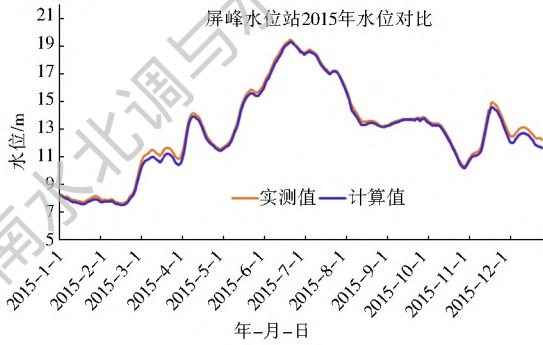


图 3 数值模型模拟值与实测值对比

Fig. 3 Comparison between simulated and measured values

多重反比例组合关系。在利用模型数值解法进行污染物扩散情况计算的时候,首先需要确定一个起算的污水流量值,由此对应一个污染物的起算浓度。在概化排污口一系列流量 $Q_{污}$ 与浓度 $C_{污}$ 组合中,筛选 $C_{污}$ 值的条件是判断概化排污口排污后污染物到达水功能区下断面时,其浓度是否刚好达到水质控制目标的上限。

根据污染源现状调查成果和近期规划,研究区域近期入湖污水总量将达到 22.77 万 t/d,即污水排放流量可达 $2.64 m^3/s$ 。在预留部分发展空间基础上,确定鄱阳湖九江工业用水区纳污能力试算的污水排放量初值为 $3 m^3/s$,由此可推出,概化排污口 COD 的对应浓度约为 $87 mg/L$,氨氮对应浓度约为 $0.9 mg/L$,以此确定不同浓度的试算工况见表 3。

表 3 鄱阳湖九江工业用水区水域纳污能力优化试算工况组 ($Q_{污} = 3 m^3/s$)

Tab. 3 Trial conditions for calculating assimilative capacity of Jiujiang industrial water function zone beside Poyang Lake

输入组合	COD / ($mg \cdot L^{-1}$)	氨氮 / ($mg \cdot L^{-1}$)
(1)	87	0.9
(2)
(3)	100	1.2
(4)
(5)	120	1.6
(6)	130	1.8

对多组污染物输入浓度进行试算,取各代表断

采用 2015 年屏峰站水位和蛤蟆石断面水质实测数据对模型进行验证,数值模型的验证结果显示模拟误差在可接受范围内(图 3)。

3.3.2 污水排放量固定时允许排放浓度的试算

为了便于计算,通常需要将水功能区排污口概化至河段中间位置。在水域纳污能力初始值 M_0 确定的情况下,污水排放量 $Q_{污}$ 与污染物浓度 $C_{污}$ 有

面污染物最大浓度统计不同污染物输入浓度工况下 COD 浓度、氨氮浓度沿程变化(表 4)。

从表 4 中可以看出,当概化排污口污水排放流量为 $3 m^3/s$,COD 排放浓度为 $95 mg/L$,氨氮排放浓度为 $1.5 mg/L$ 时,鄱阳湖九江工业用水区下断面、距离概化排污口下游 2 500 m 处 COD 和氨氮浓度均可恢复至地表水Ⅲ类控制目标(分别为 $15 mg/L$ 和 $0.5 mg/L$)。在上述污水量和污染物输入条件下,计算得出概化排污口的污染物入湖负荷量即为鄱阳湖九江工业用水区的水域纳污能力,其中 COD 为 $8 988 t/a$,氨氮为 $142 t/a$ 。

3.3.3 污染物排放浓度固定时允许排放流量的试算

为严格控制入河污染物浓度,鄱阳湖九江工业用水区要求现有排污口污水排放标准执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准,即 COD 排放浓度为 $50 mg/L$,氨氮排放浓度为 $5 mg/L$ 。上述试算计算结果中,氨氮已满足污水排放标准要求,在该排污浓度下计算得出的氨氮纳污能力数值已经是一个严格限值。而 COD 为 $95 mg/L$ 的排放浓度不满足污水排放标准,因此需继续优化 COD 的排放浓度和排放量。

表 4 计算结果显示,在污水排放流量一定的情况下,污染物排放浓度越小,对排污口下游水质的影响越小,当 COD 排放浓度为 $95 mg/L$ 时,鄱阳湖九江工业用水区下断面(概化排污口下游 2 500 m)处

表4 COD和氨氮纳污能力优化试算过程(数值模型法, $Q_{污}=3\text{ m}^3/\text{s}$)

Tab.4 Trial calculation process for assimilative capacity of COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ by numerical method ($Q_{\text{sewage}}=3\text{ m}^3/\text{s}$)

指标	COD/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)								氨氮/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)							
	120	110	100	95	94	92	90	87	1.8	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1	0.9
污染物排放浓度	120	110	100	95	94	92	90	87	1.8	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1	0.9
概化排污口处浓度	100.4	92.8	85.3	83.8	83.1	81.6	77.78	68.0	1.45	1.32	1.24	1.17	1.09	1.02	0.87	0.79
下游100 m 浓度	68.7	63.8	58.9	57.9	57.4	56.5	54.01	47.6	1.12	1.02	0.97	0.92	0.87	0.82	0.72	0.67
下游200 m 浓度	48.8	45.6	42.3	41.7	41.4	40.7	39.1	34.9	0.89	0.83	0.80	0.76	0.73	0.70	0.63	0.60
下游500 m 浓度	28.1	26.6	25.1	24.8	24.6	24.3	23.54	21.6	0.66	0.63	0.61	0.60	0.58	0.57	0.54	0.52
下游1 000 m 浓度	24.5	23.3	22.1	21.8	21.7	21.4	20.82	19.2	0.62	0.59	0.58	0.57	0.55	0.54	0.52	0.50
下游1 500 m 浓度	19.4	18.6	17.8	17.6	17.6	17.4	16.98	15.9	0.56	0.54	0.53	0.53	0.52	0.51	0.49	0.48
下游2 000 m 浓度	17.4	16.8	16.1	16	15.9	15.8	15.48	14.6	0.54	0.52	0.52	0.51	0.50	0.50	0.48	0.47
下游2 500 m 浓度	16.2	15.7	15.1	15	14.9	14.8	14.58	13.9	0.52	0.51	0.50	0.49	0.49	0.48	0.47	0.46

COD 浓度已衰减至 15 mg/L , 由此可推断 COD 排放浓度执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标 ($\text{COD}\leq 50\text{ mg/L}$) 时, 概化排污口下游 2 500 m 处 COD 浓度低于 15 mg/L , 优于 0 类水质管理目标, 此时该水功能区的承载能力没有得到完全利用。基于此, 以 COD 排放浓度 50 mg/L 为模型输入条件, 以鄱阳湖九江开发利用区下断面 $\text{COD}\leq 15\text{ mg/L}$ 为控制条件, 试算可允许最大污水排放量。

通过对多组流量输入条件进行试算, 取各代表断面污染物浓度最大值统计得到不同工况下 COD 浓度沿程变化表, 见表 5。

试算结果表明, 当概化排污口 COD 浓度为 50 mg/L , 污水流量为 $6.2\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 鄱阳湖九江工业用水区下断面 COD 可满足 0 类水质控制目标 (15 mg/L)。在上述污染物排放浓度和污水排放量条件下, 概化排污口 COD 入湖负荷量即为鄱阳湖九江工业用水区 COD 的纳污能力, 为 $9\ 776\text{ t/a}$ 。

表5 COD 达标排放浓度下日最大排放量试算工况

Tab.5 Trial calculation process for maximum daily discharge when COD discharge concentration meets the standard

试算工况/沿程浓度	$Q=3\text{ m}^3/\text{s}, C_{\text{COD}}=95\text{ mg/L}$	$C_{\text{COD}}=50\text{ mg/L}$			
		$Q=5.7\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=6\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=6.2\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=6.4\text{ m}^3/\text{s}$
概化排污口处浓度	83.81	45.54	45.82	46.03	46.07
下游100 m 浓度	57.93	37.01	37.66	38.18	38.28
下游200 m 浓度	41.69	30.64	31.45	32.13	32.26
下游500 m 浓度	24.75	21.75	22.50	23.16	23.29
下游1 000 m 浓度	21.80	19.88	20.58	21.20	21.32
下游1 500 m 浓度	17.63	16.56	17.09	17.56	17.65
下游2 000 m 浓度	16.00	15.17	15.61	15.99	16.07
下游2 500 m 浓度	15.00	14.33	14.70	15.01	15.11

综合上述试算结果, 得到鄱阳湖九江工业用水区的最优水域纳污能力 COD 为 $9\ 776\text{ t/a}$, 氨氮为 142 t/a 。污染物按该纳污能力负荷量排放时 COD 和氨氮影响范围, 见图 4。

4 讨论

4.1 解析解法的局限性分析

解析解法是目前普遍采用的一种开发利用区水域纳污能力计算方法, 也是《水域纳污能力计算规程》(GB/T 25173-2010) 推荐使用的一种方法。但是, 解析解法也存在一定的局限性^[26]。

(1) 河流二维模型横断面概化的局限性。进行解析解计算时必须假定污染物连续恒定排放, 计算河段横断面为矩形, 对于横断面不能概化为矩形的河段, 原则上只能通过数值模型求解计算。鄱阳湖湖口水道地形复杂, 复式断面特征明显, 河道岸滩地形变化造成的影响, 解析解法无法精确反应。利用二维模型进行解析解求解的另一重要特点条件是假定岸边计算水域断面流速为恒定均匀的, 这种概化忽略了断面横向的流速变化, 因此通过解析解获得的水域纳污能力值是较为粗略的。

(2) 计算水域污染带宽度取值的局限性。对于河宽比较大的大型河流, 污染物从岸边排放后不可

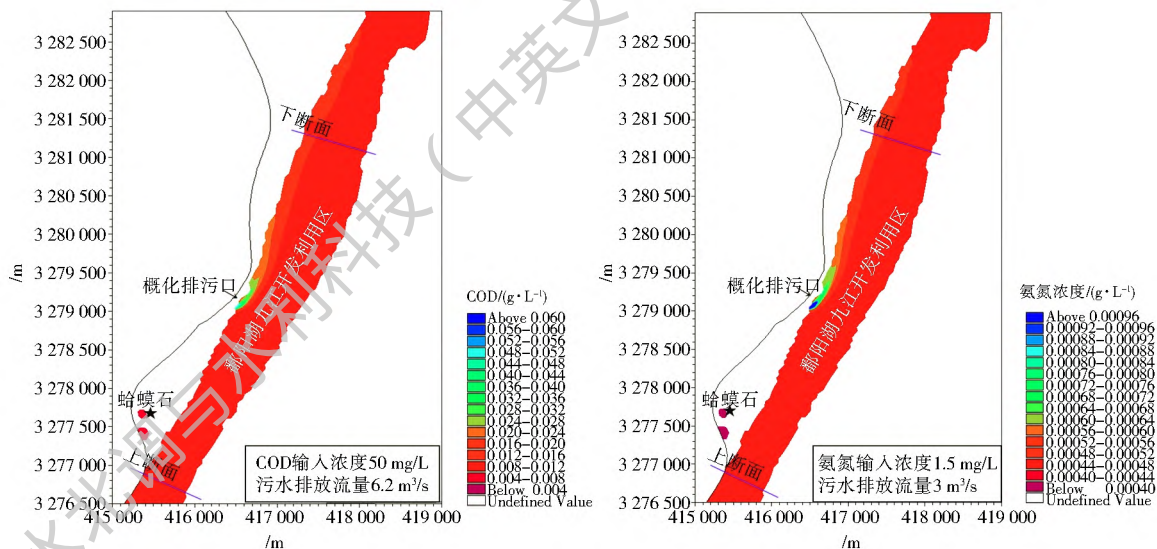


图 4 污染物按最优纳污能力量排放时 COD 和氨氮影响范围图(90% 枯水条件)
 Fig. 4 Influence area of COD and NH₃-N under optimal discharge (90% low-water condition)

能达到全断面混合,即容许污染物降解稀释的混合区一般在岸边一定范围内,此时需要计算岸边水域的纳污能力。在不使用数值模型模拟的情况下,岸边水域计算范围的取值存在较大不确定性,同样对水域纳污能力计算结果的准确性产生一定影响。

解析解法获得的纳污能力比较适合作为数值解模型试算的起算条件,是纳污能力精确计算的重要参考,有助于快速确定水功能区纳污能力的最优值。

4.2 丰水期壅水条件影响分析

鄱阳湖是长江中下游最大的通江湖泊,与长江之间存在着复杂的水文和水动力交互作用,而江水倒灌是长江顶托过程的极端现象。鄱阳湖壅水后,湖口和星子之间的水位差变小,流速减小,对污染物迁移扩散可能产生不利影响,因此有必要进一步讨

论特征丰水期水文条件下的排污影响,即保持概化排污口排污条件(最佳排放流量和浓度)不变,分析特征水动力条件下的污染物扩散影响。

一般情况下,当湖口与星子之间的水位差为 0 时,鄱阳湖九江工业用水区水流条件对污染物迁移扩散较为不利。当湖口与星子之间水位差为 0 时有两种情况发生,一种是长江高水位对鄱阳湖水面产生顶托,但是没有发生江水倒灌现象;另一种是在江水顶托基础上进一步发生了江水倒灌现象。筛选 1950-2015 年期间湖口与星子之间水位差为 0 的日期,发现 1971 年 7 月 30 日和 1963 年 8 月 25 日最具代表性,此时鄱阳湖水位处于相对较低的状态,研究区域的水动力条件也相对不利,故以此作为丰水期的工况条件(表 6)。

表 6 丰水期水动力水质模型计算工况
 Tab. 6 Calculation conditions for numerical model in flood season

工况	丰水期情景	水文条件			概化排污口排放量		背景浓度/(mg·L ⁻¹)	
		湖口流量/(m ³ ·s ⁻¹)	湖口水位/m	星子水位/m	COD	氨氮	COD	氨氮
1	江水顶托影响,湖口与星子水位差为 0,且水位较低(以 1971 年 7 月 30 日为代表)	3 210	13.32	13.32	6.2 m ³ /s 50 mg/L	3 m ³ /s 1.5 mg/L	11.21	0.26
2	江水倒灌影响,湖口与星子水位差为 0,且水位较低(以 1963 年 8 月 25 日为代表)	- 3680	15.54	15.54	6.2 m ³ /s 50 mg/L	3 m ³ /s 1.5 mg/L	11.21	0.26

计算丰水期两组工况,统计分析排污口下游沿程污染物最大浓度变化,结果见图 5 和表 7。模拟计算表明,丰水期在长江江水顶托、倒灌等特征水文条件下,按照 COD 9 776 t/a、氨氮 142 t/a 污染物入

湖量计算,鄱阳湖开发利用区下断面 COD 和氨氮浓度均优于水质控制目标。因此,本研究计算的 COD 和氨氮纳污能力在丰水期特征水文条件下也是符合水质控制条件的。

表 7 丰水期特征水文条件下排污污染物影响计算结果

Tab. 7 Influence area of COD and NH₃-N under characteristic hydrological conditions in flood season

特征水文条件	COD 浓度/(mg·L ⁻¹)		氨氮浓度/(mg·L ⁻¹)	
	1971 年 7 月 30 日	1963 年 8 月 25 日	1971 年 7 月 30 日	1963 年 8 月 25 日
概化排污口	12.1	11.5	0.27	0.26
排污口下游 100 m	10.8	9.5	0.27	0.26
排污口下游 200 m	10.5	6.4	0.26	0.18
排污口下游 500 m	10.1	6.4	0.25	0.18
排污口下游 1 000 m	9.4	6.3	0.24	0.18
排污口下游 1 500 m	9.3	6.1	0.24	0.17
排污口下游 2 000 m	9.2	6.6	0.23	0.18
排污口下游 2 500 m	9.1	6.9	0.23	0.19

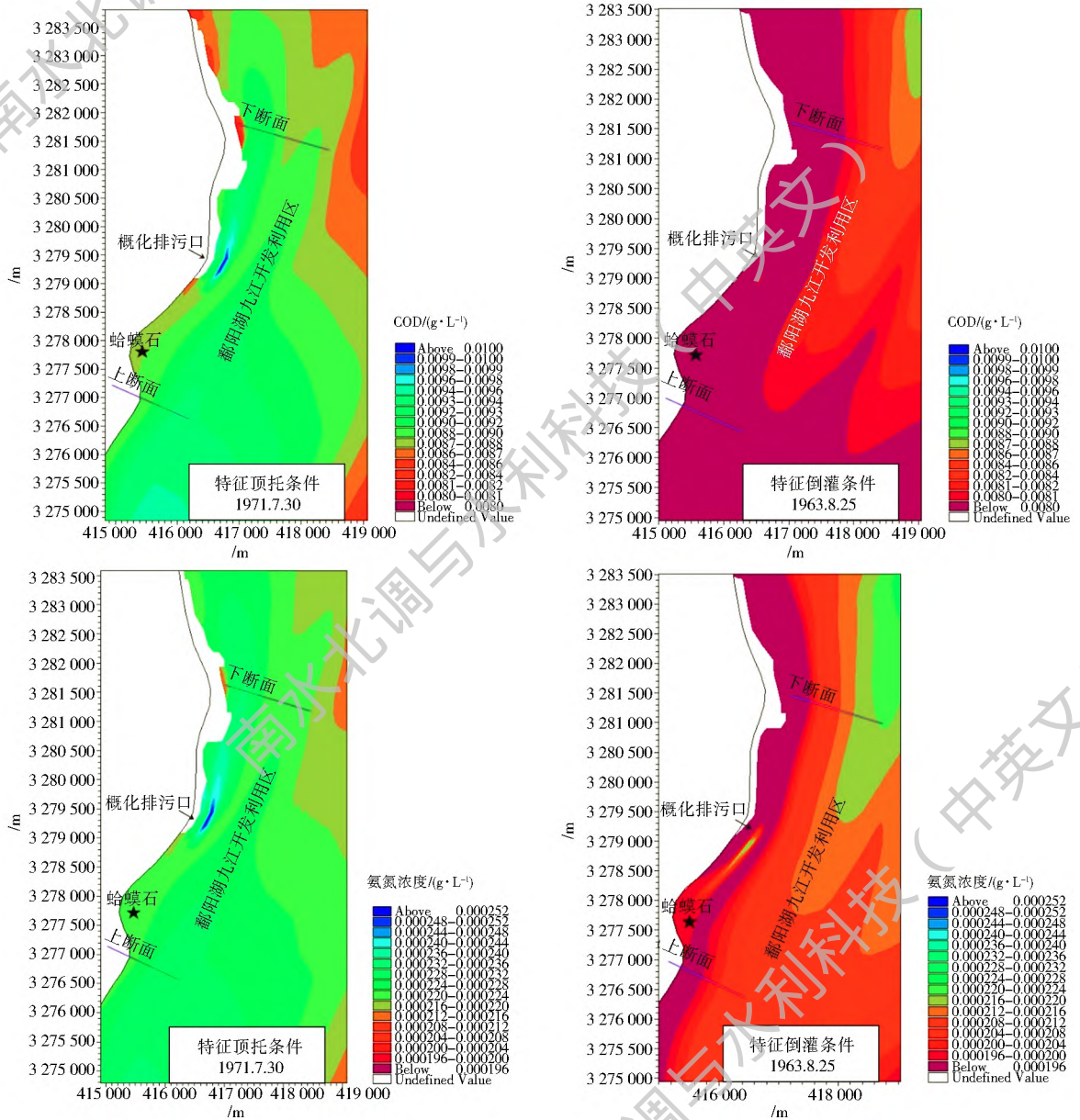


图 5 江水顶托和倒灌条件下概化排污口附近 COD 和氨氮浓度分布

Fig. 5 Concentration distribution of COD and NH₃-N under river water jacking and backflow conditions

5 结论

国内水功能区管理实践中,开发利用区纳污能

力计算大多采用公式的解析解法,但在模型概化、污染带宽度取值等方面存在较多局限性。本文利用公式的解析解法与数值解法相结合的方法对鄱阳湖九

江开发利用区纳污能力进行了联合求解。通过研究主要得出以下结论。

(1) 平面二维水动力水质方程的求解方法分为解析解法和数值解法, 其中解析解法计算结果较为粗略, 而数值解法计算结果更为准确。利用解析解法计算结果作为数值解法试算的起算条件, 有助于快速确定水功能区纳污能力的最优值。

(2) 利用数值解法进行计算时, 在污染物排放总负荷量一定情况下, 污水排放量和污染物排放浓度存在反比例组合关系, 需以水功能区断面水质管理需求作为判断条件, 遴选污水排放量和污染物排放浓度的最佳组合, 同时需综合考虑河道形态、岸边水深和流速变化、特征水文条件影响, 以及污染物排放标准要求等条件。

(3) 经计算, 鄱阳湖九江开发利用区纳污能力最优值为 COD 为 9 776 t/a, 氨氮为 142 t/a。

参考文献(References):

- [1] 罗小勇主编. 基于水功能区的纳污能力计算理论方法及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016. (LUO X Y. Theoretical method and application of allowable permitted Assimilative Capacity based on water function zone[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2016. (in Chinese))
- [2] 夏青. 水环境容量[J]. 环境保护科学, 1981(4): 21-29. (XIA Q. Water environment capacity[J]. Environmental Protection Science, 1981(4): 21-29. (in Chinese)) DOI: 10.16803/j.cnki.issn.10046216.1981.04.005.
- [3] 董飞, 刘晓波, 彭文启, 等. 地表水水环境容量计算方法回顾与展望[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 451-463. (DONG F, LIU X B, PENG W Q, et al. Calculation methods of water environmental capacity of surface waters: Review and prospect[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 451-463. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2014.03.020.
- [4] LIEBMAN J C, LYNN W R. The optimal allocation of stream dissolved oxygen[J]. Water Resource Research, 1966, 2(3): 581-591. DOI: 10.1029/WR002i003p00581.
- [5] REVERLLE C S, LOUCKS D P, LYNN W R. Linear programming applied to water quality management[J]. Water Resource Research, 1968, 4(1): 1-9. DOI: 10.1029/WR004i001p00001.
- [6] FUJIWARA O, GNANENDRAN S K, OHGAKI S. River quality management under stochastic stream flow[J]. Journal of Environmental Engineering, 1986, 112(2): 185-198. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1986)112:2(185).
- [7] U S P A. Technical guidance manual for performing wasteload allocation, book: VII: Permit averaging periods[R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, Office of Water, 1984: 14.
- [8] ELLIS J H, MCBEAN E A. Optimization modeling of water quality in an uncertain environment[J]. Water Resource Research, 1987, 23(12): 2227-2238. DOI: 10.1029/WR021i007p00934.
- [9] 夏青, 孙艳, 贺珍, 等. 水污染物总量控制实用计算方法概要[J]. 环境科学研究, 1989, 2(3): 1-73. (XIA Q, SUN Y, HE Z. Summary of practical calculation methods for total amount control of water pollutants[J]. Research of Environmental Sciences, 1989, 2(3): 1-73. (in Chinese)) DOI: 10.13198/j.res.1989.03.3.xiaq.001.
- [10] 韩能进. 河流一维水质模型在水环境容量计算方面的应用[J]. 环境科学与技术, 1995(4): 43-45. (HAN N J. Application of one dimensional river water quality model to water environmental capacity calculation[J]. Environmental Science and Technology, 1995(4): 43-45. (in Chinese)) DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.1995.04.013
- [11] 曾思育, 徐一剑, 张天柱. 环状河网水质模型在水污染控制规划中的应用[J]. 水科学进展, 2004, 15(2): 193-196. (ZENG S Y, XU Y J, ZHANG T Z. Application of unsteady water quality model for looping river network to water pollution control planning[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(2): 193-196. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2004.02.012.
- [12] 张红举, 甘升伟, 袁洪州, 等. 环太湖河流入湖水水质控制浓度分析[J]. 水资源保护, 2012, 28(6): 8-11. (ZHANG H J, GAN S W, YANG H Z, et al. Analysis of controlled concentration of water quality of rivers around Taihu Lake[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(6): 8-11. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2012.05.002.
- [13] 李如忠, 汪家权, 王超, 等. 不确定性信息下的河流纳污能力计算初探[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 359-363. (LI R Z, WANG J Q, WANG C, et al. Calculation of river water environmental capacity under unascertained information[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(4): 359-363. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2003.04.013.
- [14] 周娜, 贾仰文, 胡鹏, 等. 松花江流域冰封期水功能区限制纳污能力控制研究[J]. 水利学报, 2014, 45(5): 557-565. (ZHOU N, JIA Y W, HU P. Research on the regulation of water function reaches pollution load in freeze up period of Songhua River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(5): 557-565. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.05.007.
- [15] 张守平, 魏传江, 王浩, 等. 流域/区域水量水质联合配置研究 I: 理论方法[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 757-766. (ZHANG S P, WU C J, WANG H, et al. Basin/region water quality allocation I. Theory and method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 757-766. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.07.001.
- [16] 张晓, 罗军刚, 解建仓. 考虑取水口和支流的河流纳污能力计算模型研究与应用[J]. 水利学报, 2017, 48(3): 317-324. (ZHANG X, LUO J G, XIE J C. Study on the calculation model of river water environment capacity considering water intake and tributary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(3): 317-324. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20160270.

(下转第 129 页)

- erties toward some heavy metal ions[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2014, 59(5): 1719-1726. DOI: 10.1021/jc500219e.
- [76] GE H, MA Z. Microwave preparation of triethylenetetramine modified graphene oxide/chitosan composite for adsorption of Cr(VI)[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 131: 280-287. DOI: 10.1016/j.carbpol.2015.06.025.
- [77] LEI Y, CHEN F, LUO Y, et al. Synthesis of three dimensional graphene oxide foam for the removal of heavy metal ions[J]. *Chemical Physics Letters*, 2014, 593(6): 122-127. DOI: 10.1016/j.cplett.2013.12.066.
- [78] 刘阳, 顾平, 张光辉. 氧化石墨烯分离膜的制备及其水处理领域的应用进展[J]. *化工进展*, 2017, 36(11): 4151-4159. (LIU Y, PING GU, ZHANG G. Fabrication of graphene oxide assisted membranes and its applications in water treatment and purification[J]. *Chemical Industry & Engineering Progress*, 2017. (in Chinese))
- [79] ZHANG Y, ZHANG S, CHUNG T S. Nanometric graphene oxide framework membranes with enhanced heavy metal removal via nanofiltration[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(16): 10235-10242. DOI: 10.1021/acs.est.5b02086.
- [80] MUKHERJEE R, BHUNIA P, DE S. Impact of graphene oxide on removal of heavy metals using mixed matrix membrane[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 292: 284-297. DOI: 10.1016/j.cej.2016.02.015.
- [81] CHAUKE V P, MAITY A, CHETTY A. High performance towards removal of toxic hexavalent chromium from aqueous solution using graphene oxide alpha cyclodextrin poly pyrrole nanocomposites[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2015, 211(2939): 71-77. DOI: 10.1016/j.molliq.2015.06.044.
- [82] CHEN J, XING H, GUO H, et al. adsorbent[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, 2(31): 12561-12570. DOI: 10.1039/c4ta02004a.
- [83] ZHANG H, CHANG Q, JIANG Y, et al. Synthesis of KMnO₄ treated magnetic graphene oxide nanocomposite (Fe₃O₄@GO/MnO_x) and its application for removing of Cu²⁺ ions from aqueous solution[J]. *Nanotechnology*, 2018, 29(13): 135706. DOI: 10.1088/1361-6528/aaaa2f.
- [84] LI X, ZHOU H, WU W, et al. Studies of heavy metal ion adsorption on chitosan/sulfonyl functionalized graphene oxide composites. [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2015, 448: 389-397. DOI: 10.1016/j.jcis.2015.02.039.
- [85] DONG Z, ZHANG F, WANG D, et al. Polydopamine mediated surface functionalization of graphene oxide for heavy metal ions removal[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2014, 224: 88-93. DOI: 10.1016/j.jssc.2014.06.030.
- [86] LIU L, DING L, WU X, et al. Enhancing the Hg(II) removal efficiency from real wastewater by novel thymine grafted reduced graphene oxide complexes[J]. 2016, 55(24). DOI: 10.1021/acs.iecr.6b01359.

(上接第 88 页)

- [17] 王新娟, 孙颖, 邵景力, 等. 北京西郊地区地下水纳污能力分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(6): 31-34. (WANG X J, SUN Y, SHAO J L, et al. Pollutant carrying capacity analysis of groundwater in the Western Suburbs of Beijing[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(6): 31-34. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2014.06.007.
- [18] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版, 2004. (RUI X F. *Physical Hydrology* [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2004. (in Chinese))
- [19] 裴中平, 杨芳, 辛小康. 入河排污口设置论证技术与实例[M]. 武汉: 长江出版社, 2017. (PEI Z P, YANG F, XIN X K. *Technology and practice For demonstration on outfall setting up* [M]. Wuhan: Changjiang Press, 2017. (in Chinese))
- [20] 逢勇, 陆桂华. 水环境容量计算理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016. (PANG Y, LU G H. *Theory and application of water environmental capacity calculation* [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese))
- [21] 苏丽娟. 双边空间分数阶对流扩散方程的几种数值解法[D]. 济南: 山东大学, 2010. (SU L J. *Some numerical methods for fractional diffusion equations* [D]. Jinan: Shandong University, 2010. (in Chinese))
- [22] 谢兰英, 奚红霞, 谢新平, 等. 不同边界条件下球形颗粒吸附剂内扩散方程的分析解和数值解的比较[J]. *离子交换与吸附*, 2000, 16(4): 289-295. (XIE L Y, XI H X, XIE X P, et al. A comparison between analytical solutions and numerical solution of diffusion equation in spherical adsorbent particle under different boundary conditions[J]. *Ion Exchange and Adsorption*, 2000, 16(4): 289-295. (in Chinese)) DOI: 10.16026/j.cnki.iea.2000.04.001.
- [23] GB/T 25173-2010. 水域纳污能力计算规程[S]. 2010. (GB/T 25173-2010. Code of practice for computation on allowable permitted assimilative capacity of water bodies[S]. 2010. (in Chinese))
- [24] ZHAO D H, SHEN H W, TABIOS G Q, et al. Finite volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins[J]. *Hydr Engng, ASCE*. 1994, 120(7): 863-883. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1994)120:7(863)
- [25] SLEIGH P A, GASKELL P H, BERZINS M, et al. An unstructured finite volume algorithm for predicting flow in rivers and estuaries[J]. *Computers & Fluids*, 1998, 27(4): 479-508. DOI: 10.1016/S0045-7930(97)00071-6.
- [26] 马莉, 桂和荣, 曹彭强. 河流污染二维水质模型研究及 RMA4 模型概述[J]. *安徽大学学报(自然科学版)*, 2011, 35(1): 102-108. (MA L, GUI H R, CAO P Q. Study on integration of 2D water quality models and review of RMA4 model[J]. *Journal of Anhui University (Natural Science Edition)*, 2011, 35(1): 102-108. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-2162.2011.01.020.