

# 基于水动力学的中小水库藻类生长模型及蓝藻暴发的模拟

汪浩, 李玲燕

(温岭市环境保护局, 浙江温岭 317500)

**摘要:** 应用 PHREEQC 软件建立了基于水动力学作用的温岭市太湖水库藻类生长模型。选用 2007 年度温岭市太湖水库总磷、总氮、水温、叶绿素 a 的实测值, 采用三次样条插值的方法估计出每一天的总磷、总氮、水温、叶绿素 a 的数值, 对模型参数进行了率定和验证。将建立的模型应用于 2009 年温岭市桐岭水库水华暴发的模拟预测中, 结果表明本文所建立的模型进行模拟运算精度较高, 可以应用于中小型水库水华暴发的模拟预测方面。  
**关键词:** PHREEQC 软件; 藻类生长模型; 水动力学; 样条插值; 温岭市太湖水库  
**中图分类号:** X171.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1006-8759(2012)01-0021-05

## THE DEVELOPMENT OF ALGAE GROWTH MODEL BASED ON HYDRODYNAMICS IN SMALL AND MEDIUM- SIZED RESERVOIR AND THE SIMULATION STUDIES ON THE ALGAE BLOOMS

WANG Hao, LI Ling-yan

(Wenling Environmental Protection Bureau, Wenling Zhejiang 317500, China)

**Abstract:** An algae growth model, based on the influence of water flow velocities on algae growth, was developed in this study using PHREEQC software. The experimental data of total phosphorous, total nitrogen, water temperature and chlorophyll a in Wenling Taihu reservoir in 2007 were adopted. Estimated data of every day were obtained by interpolation method for the calibration and verification of the model parameters. The established model was applied in the simulation and prediction of the algae blooms in Wenling Tongling reservoir in 2009. It was demonstrated that the simulated results fitted well with the measured data, which indicated that the developed model could be used to predict the algae blooms in small and medium-sized reservoirs.

**Keywords:** PHREEQC software, algae growth model, hydrodynamics, spline interpolation, Wenling Taihu reservoir

我国的淡水湖泊如滇池、太湖、巢湖由于水体环境富营养化, 每年夏、秋季都会暴发蓝藻水华<sup>[1]</sup>。微囊藻是水华蓝藻中的一个重要优势类群。在我

国大多数富营养化湖泊中, 微囊藻水华发生频率高、分布广、规模大且持续时间长<sup>[2-4]</sup>。近年来, 国外一些供水水库也报道暴发微囊藻水华<sup>[5,6]</sup>。桐岭水库是温岭市城南镇的一个集中式饮用水源地, 2009年8月初及11月初分别两次暴发微囊藻水华。2009年11月11日监测结果显示水库取水口

处藻类密度高达  $1.81 \times 10^7$  个/L,藻类群落极为单一,微囊藻为绝对优势种,占总藻类密度的 99.46%。

水华暴发时水体中藻类尤其是微囊藻异常繁盛,破坏湖泊的水生生态系统,恶化水质,并且产生毒素直接威胁到饮用水安全。为了提高应对蓝藻水华的能力,徐恒省等<sup>[7,8]</sup>提出构建蓝藻水华预警监测体系,开发水质预警模型,研判水华暴发的预警结果及其发展趋势。研发适用于水源地的水质预警模型,动态模拟藻类生长过程,对于揭示水华暴发的机制及防控水华暴发具有重大意义。许秋瑾等<sup>[9]</sup>建立了太湖藻类生长模型,模型稳定性良好且能成功地描述各状态变量,然而该模型未考虑水动力学特征。PHREEQC 是美国地调所开发的可用于描述局部平衡反应、动态生物化学反应的水文地球化学模拟软件<sup>[10]</sup>。目前国内已有学者研究基于 PHREEQC 的藻类生态动力学模型,且获得较好的拟合效果<sup>[11,12]</sup>,表明 PHREEQC 软件较适合国内藻类生态动力学模型的构建。

因此,本研究应用 PHREEQC 软件构建温岭市太湖水库藻类生长的数学模型,探索在总氮、总磷、水温、流速变化等条件下水库藻类生长规律,并应用模型对 2009 年 8 月初温岭市桐岭水库水华暴发进行模拟预测。7 月 7 日至 8 月 3 日期间桐岭水库每一天总磷、总氮、水温、叶绿素 a 的数值由三次样条插值的办法得到。模拟的时候以插值得到的叶绿素 a 的变化为主线进行计算,将得到的总磷、总氮的计算结果与插值数据进行了比

对,并得出易引起水库微囊藻水华暴发的水温及水动力学条件。结果表明本文所建立的模型进行模拟运算精度较高,可以应用于中小型水库水华暴发的模拟预测方面。

### 1 实验方法

总磷测定采用钼酸铵分光光度法(GB/T 11893-1989);总氮测定采用过硫酸钾消解紫外分

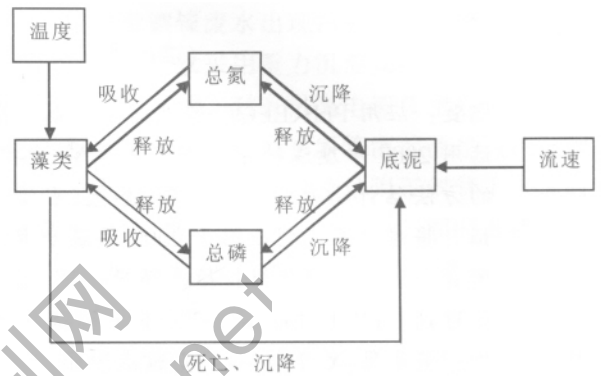


图1 藻类、总氮、总磷及水温、流速相互关系

光光度法(GB/T 11894-1989);叶绿素 a 的测定详见《水和废水监测分析方法(第四版)》;

三次样条插值利用 Matlab 程序中的 spline 函数来实现;PHREEQC 软件当前最新的版本为 version 2.17.01。

### 2 藻类生长模型的建立

参照近年来一些文献对于藻类动态模拟的研究所建立的藻类生长模型<sup>[9,11,12]</sup>,本研究结合实际

$$(1) \frac{\partial c_1}{\partial t} = \left[ Ba - Ma - \frac{Vs_1}{D} \right] c_1$$

$$(2) \frac{\partial c_2}{\partial t} = Ma \times c_1 \times aPC - Ba \times c_1 \times aPC - \frac{Vs_2}{D} (1 - fD_2) c_2 + RS_P$$

$$(3) \frac{\partial c_3}{\partial t} = Ma \times c_1 \times aNC - Ba \times c_1 \times aNC - \frac{Vs_3}{D} (1 - fD_3) c_3 + RS_N$$

$$(4) Ba = B_{amax} \times f(T) \times f(N) \times f(P)$$

$$(5) f(P) = \frac{c_2}{K_P + c_2}$$

$$(6) f(N) = \frac{c_3}{K_N + c_3}$$

$$(7) RS_P = r_2 \times e^{0.05v}$$

$$(8) RS_N = r_3 \times e^{0.06v}$$

$$(9) T \leq T_{opt} \quad f(T) = \theta^{T - T_{opt}}$$

$$(10) T > T_{opt} \quad f(T) = \theta^{T - T_{opt}}$$

$$Ma = M_{amax} \times \theta^{T - T_{opt}} \times f(P) \times \frac{c_1}{K_m + c_1}$$

$$Ma = M_{amax} \times f(P) \times \frac{c_1}{K_m + c_1}$$

工作, 建立一个基于 PHREEQC 的中小型水库藻类生长模型, 考虑水动力作用对藻类生长的影响, 忽略浮游动物对藻类的捕食、库体的氮磷输入和输出以及营养盐的内部转换关系。模型认为藻类生长主要与水温、总磷、总氮以及流速相关, 相互关系详见图 1。

### 2.1 模型基本方程

式中,  $Ba$  为藻类生长率;  $Ma$  为藻类死亡率; 为藻类叶绿素  $a$  浓度;  $c_2$  为总磷浓度;  $c_3$  为总氮浓度;  $RS_p$  为底泥释放总磷;  $RS_N$  为底泥释放总氮;  $f(T)$  为温度对藻类生长的影响;  $f(P)$  为总磷对藻类生长的影响;  $f(N)$  为总氮对藻类生长的影响;  $V_{s1}/D$  为藻类沉降;  $V_{s2}(1-fD_2)/D$  为总磷沉降;  $V_{s3}(1-fD_3)/D$  为总氮沉降;  $T$  为水温;  $v$  为流速。时间步长设为 120 s。

### 3 结果与讨论

表 1 藻类生长模型参数表

参数		取值	来源
Bamax /d <sup>-1</sup>	藻类最大生长率	1.49	率定得出
Mamax /d <sup>-1</sup>	藻类最大死亡率	0.3	率定得出
KN/(mg·L <sup>-1</sup> )	氮的半饱和和常数	3.0	率定得出
KP/(mg·L <sup>-1</sup> )	磷的半饱和和常数	0.3	率定得出
$\theta$	温度系数	0.9	率定得出
TopT/°C	藻类生长最佳温度	25	率定得出
aPC	藻中磷含量	0.025	文献 <sup>[11-13]</sup>
aNC	藻中氮含量	0.25	文献 <sup>[11-13]</sup>
Km/(mg·L <sup>-1</sup> )	藻类死亡率的半饱和和常数	7.9	率定得出
r2/(mg·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	底泥总磷释放率系数	9.09×10 <sup>-5</sup>	率定得出
r3/(mg·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	底泥总氮释放率系数	1.58×10 <sup>-4</sup>	率定得出

### 3.1 模型参数率定及验证结果

选用 2007 年 1 月 7 日至 2008 年 1 月 8 日期间温岭市太湖水库总磷、总氮、水温、叶绿素  $a$  的实测值, 采用三次样条插值的方法估计出每一天的数据。模拟的时候依据插值数据反推出流速值, 并尽可能使总磷、总氮、叶绿素  $a$  三者的计算值都最大程度的逼近估算值。采用 2 月份的数据进行

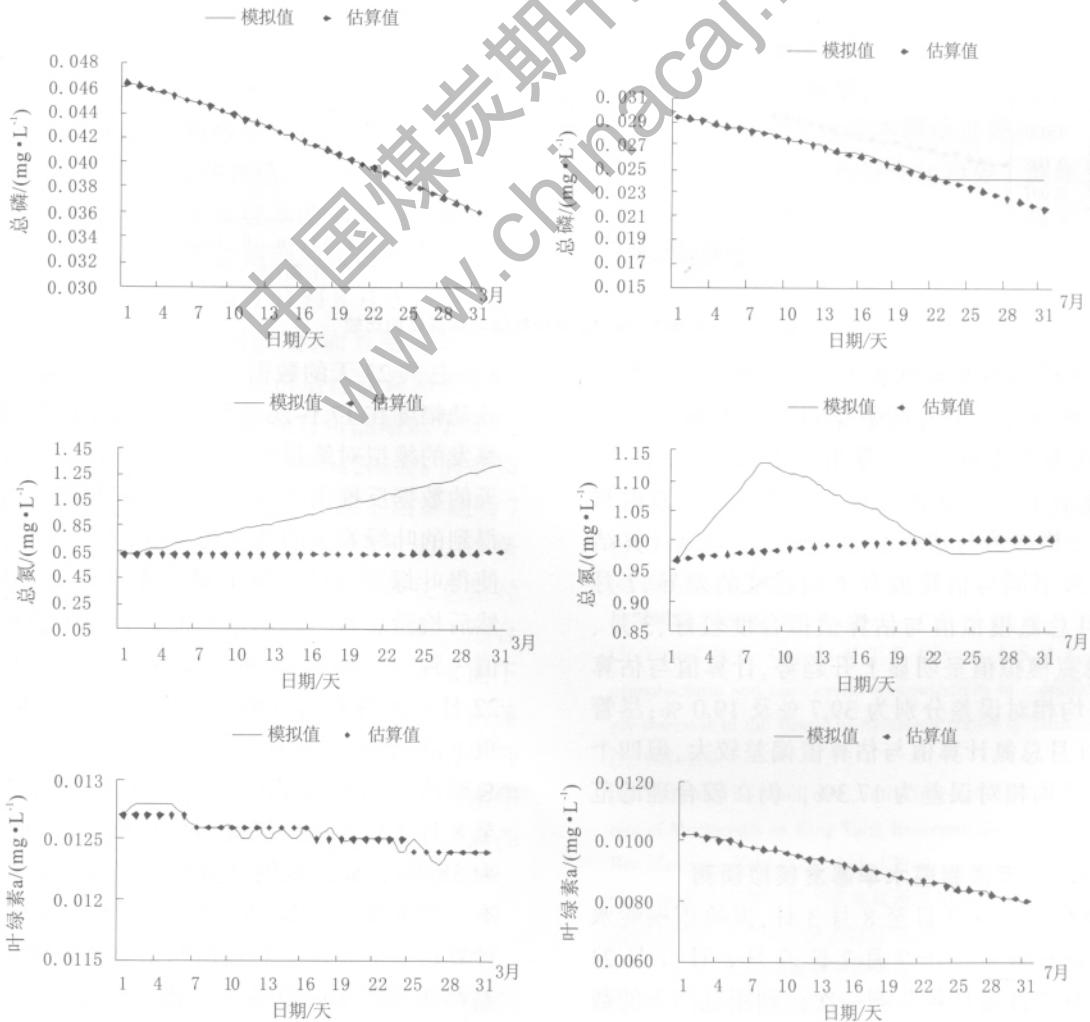


图 2 太湖水库 2 月 7 日计算值与估算值的比较

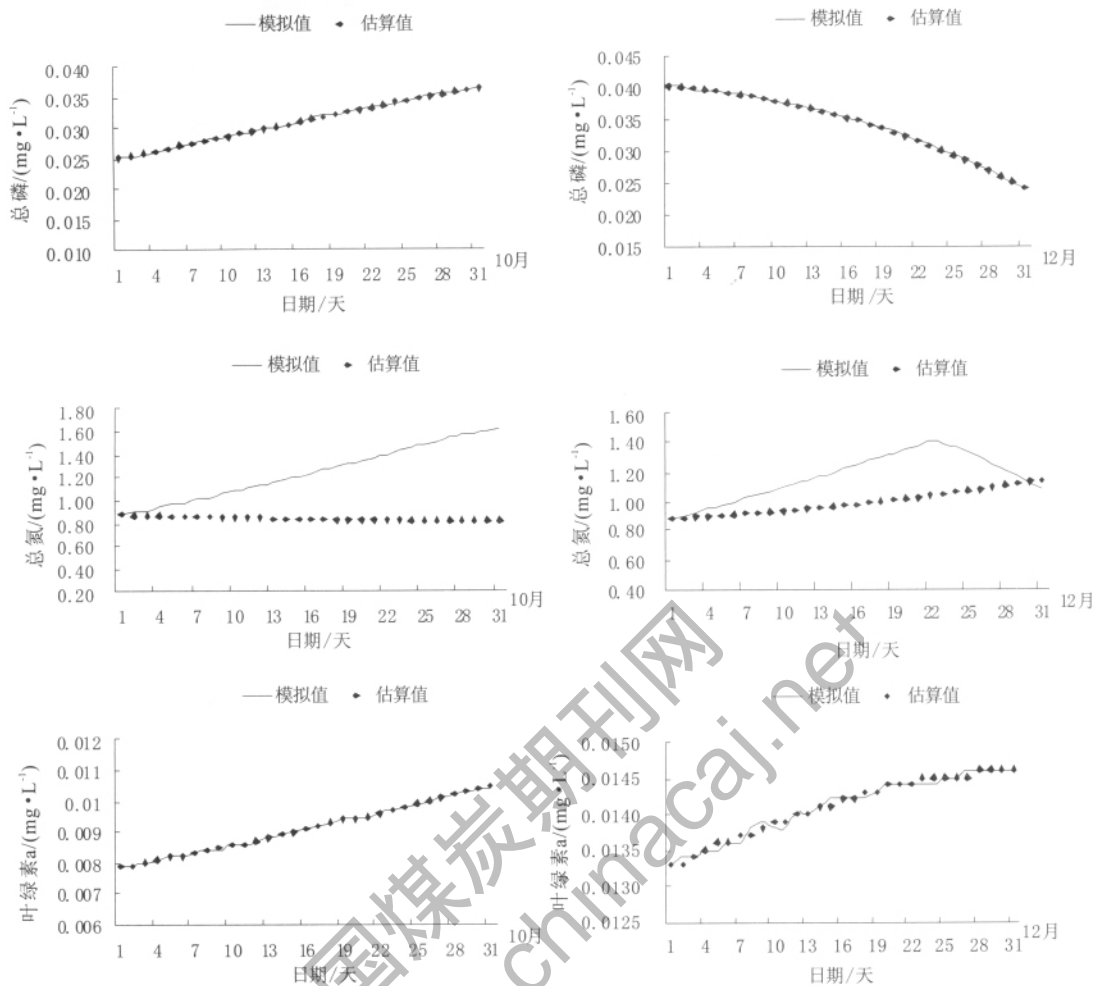


图3 太湖水库10月、12月计算值与估算值的比较

率定确定模型的参数见表1。然后选取四个季节中比较典型的一个月的数据对模型参数进行验证,分别为春季的3月、夏季的7月、秋季的10月、冬季的12月。计算结果(见图2、3)显示总磷与叶绿素a模拟值与估算值吻合较好;总氮计算结果因季节不同与估算值有不同程度的差异,7月及12月总氮模拟值与估算值拟合度较好,3月、10月总氮模拟值呈明显上升趋势,计算值与估算值的平均相对误差分别为39.7%及19.0%;尽管3月、10月总氮计算值与估算值偏差较大,但四个月总的平均相对误差为17.3%,仍在较合理的范围内。

### 3.2 桐岭水库微囊藻水华暴发模拟预测

2009年7月7日至8月3日,温岭市桐岭水库水质出现异常,于7月7日、7月8日、7月21日及8月3日每日各监测一次,利用这四天的数据通过三次样条插值的方法得到7月7日至8月

3日总共27天的数据。在这期间,水温可以回溯,波动幅度在17.1~26.6℃,而流速无法回溯。水华暴发的模拟对策是先利用7月7日及7月8日两天的数据反推出7月7日的流速初值,再以插值得到的叶绿素a的变化为主线,不断调整流速值,使得叶绿素a的计算值最大程度的逼近估算值,然后检验总磷、总氮计算值是否与插值得到的数值一致。计算结果(见图4)显示7月7日至7月22日计算得到的总磷值与插值数据基本一致,呈现下降趋势;而7月22日至8月3日计算得到的总磷值与插值数据的变化趋势不一致。7月7日至8月3日总磷模拟值与估算值的平均相对误差为38.4%;而总氮的计算结果呈现与插值数据基本一致的变化趋势,平均相对误差为4.8%。因为计算得到的总磷、总氮值与估算值的平均相对误差都在一较小的范围内,我们认为7月7日到8月3日这段时期,水华模拟基本符合实际情况。总

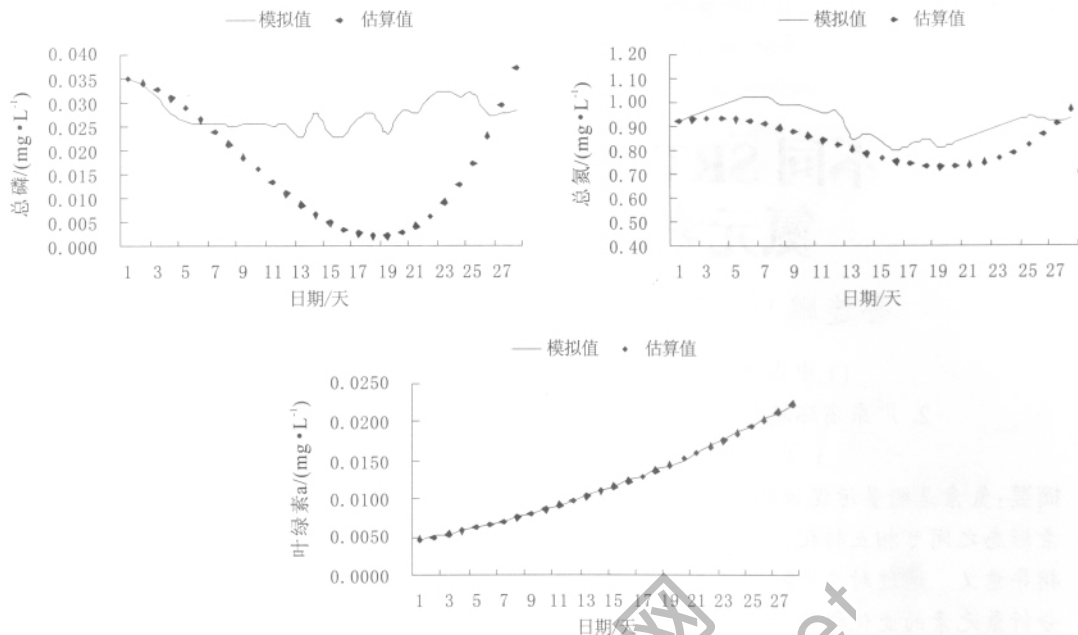


图 4 桐岭水库微囊藻水华暴发模拟预测计算结果与估算值对比

磷计算值与估算值出现不同程度的差异原因可能是:第一、插值得到的数据未必都是真实的数据;第二、藻类生长进入对数生长期大量摄取库体总磷,使得模型计算值与估算值产生偏差。进行水华暴发模拟预测相当于是从已知的未知去反推出未知的已知,我们通过模拟得到的流速的波动幅度在 11.8~19.3cm/s。从 7 月 7 日到 8 月 3 日桐岭水库水温在 17.1~26.6℃之间波动,而且绝大多数天数水温在 25℃左右。有文献报道适合微囊藻生长的温度是 20~30℃<sup>[14]</sup>,而最佳温度有可能略低于 30℃<sup>[9]</sup>。另外在富营养化的天然河流中 ≤20cm/s 的水动力学条件下更易出现水华现象<sup>[15]</sup>。综上因素说明 7 月 7 日到 8 月 3 日期间水库的水温及水动力学条件都非常利于微囊藻的生长。藻类的生长总是经历生长-衰亡-生长…这样子一个循环过程。结合 7 月 8 日藻类密度监测资料,那时候水库水面下 0.5 米处藻类密度已达 1.1×10<sup>6</sup> 个/升,微囊藻占藻类群落的 70%,我们推测尽管那时候藻类未出现异常增殖,但可能已经进入对数生长期,直至水华的暴发。当然我们也不能排除其他因素的协同作用,如水体生态失衡也会导致微囊藻水华暴发<sup>[16]</sup>。

#### 4 结论

(1)模型稳定性好,进行模拟运算能够达到较高的精度。

(2)在水温 25℃、流速 ≤20cm/s 的条件下暴发微囊藻水华的概率较大。

(3)水温和流速是本模型重要的输入变量,发展可以模拟湖库的水温变化趋势、流速变化趋势水质模型用作本模型的输入,对于预测水华暴发有积极的意义。

#### 参考文献

- [1] 汪育文,李建宏,吴敏,王一,翁永萍.南京玄武湖微囊藻水华种类组成的研究[J].环境科学,2007,28(10):2187~2191.
- [2] 郑小红,肖琳,任晶,杨柳燕.玄武湖微囊藻水华暴发及衰退期细菌群落变化分析[J].环境科学,2008,29(10):2956~2962.
- [3] 陆源,文建凡,吕天雯.滇池铜绿微囊藻 *M. aeruginosa* Kutz 的分离培养与总 DNA 提取的改进[J].湖泊科学,2001,13(3):285~288.
- [4] 孙慧群,朱琳,高文宝.淡水湖泊中微囊藻水华的成因分析[J].生物学通报,2005,40(8):23~24.
- [5] Vieira J M S, Azevedo M T P, Oliveira A S M F, et al. Toxic cyanobacteria and microcystin concentrations in a public water supply reservoir in the Brazilian Amazonia region[J]. Toxicon, 2005, 45(7): 901~909.
- [6] Al-Jassabi S, Khalil AM. Initial report on identification and toxicity of Microcystis in King Talal Reservoir, Jordan [J]. Lakes Reserv Res Manage, 2006, (11): 125~129.
- [7] 徐恒省等.太湖饮用水源地蓝藻水华预警监测体系的构建[J].环境监测管理与技术,2008,20(1):1~3,50.
- [8] 徐恒省等.太湖蓝藻水华预警监测技术体系的探讨[J].中国环境监测,2008,24(4):62~65.

沉淀-生化工艺,但这两种工艺无法实现废水中有有机污染的达标排放,尤其是国家新颁布的《电镀污染物排放标准》(GB21900-2008),对此提出了更严的要求。常规的混凝沉淀预处理效果较差,造成生化细菌无法培养,解决办法是采用多元氧化+高效气浮+生化处理工艺,其中多元氧化工艺由多元微电解和催化氧化技术组成,其关键在于采用了新型可投加式无板结多元微电解填料,作为预处理手段在部分降解有机污染物的同时,可将大分子难生化有机物转化成小分子台醇、酸类物质,以提高废水的可生化性,为后续生化处理提供良好的营养环境。

### (2) 浸锌废水处理工艺

浸锌废水中含有较高浓度的镍离子和氰根,浓度分别为 125 mg/L、40 mg/L,还有少量的铜离子,常规的次氯酸钠氧化碱性破氰效果较差,成本高,主要是镍离子与四元合金中添加的有机络合剂形成稳定的络合物。解决措施:采用过氧化氢+催化剂+混凝沉淀工艺,该工艺在实验室和工程中均取得了良好的效果,出水中镍离子和氰根达到或低于国家排放标准。

### (3) 镀镍废水处理工艺

因镀镍废水成分单一,并含有大量的贵金属-镍,故该类废水不宜采用常规化学法处理达标排放,应按照分质回收的原则进行槽边回收,工艺采用精密过滤+袋式过滤+二级反渗透回收,浓水中镍离子浓度可达到 20 g/L 以上,可直接回到镀槽内循环使用;淡水水质满足纯水要求,也可回到生产线中,实现零排放,效益明显。

### (4) 综合废水处理工艺

综合废水中含有大量的铝离子和少量的其它

金属离子,pH 在 1.5 左右,COD<sub>Cr</sub> 在 100 mg/L 左右,须考虑出水中铝离子对中水膜元件造成堵塞问题。解决措施:采用二级中和反应+混凝沉淀+过滤处理。因斜管极易结垢的形成板结,故沉淀单元的类型不宜采用斜管沉淀池,中小型规模宜采用改进型竖流式沉淀池,中型规模采用辐流式沉淀池。

### (5) 污泥问题的解决措施

铝合金镀镍废水出现污泥上浮的单元主要是有机类电镀废水采用重力沉淀及综合废水采用斜管沉淀而造成的,对有机类电镀废水改为气浮工艺即可解决,而综合废水斜管沉淀池是因沉淀池排泥不及时造成漂泥,以及粘附于斜管上老泥时间久后上浮,解决办法是加强管理,同时改用竖流式沉淀池,增大泥斗坡度,设置排泥管冲洗系统。对污泥脱水困难问题,除改用弱阳离子型絮凝剂外,对板框压滤机,采用带毛刺的滤布;对带式压滤机,采用带预浓缩的单元的压滤机。

## 5 结语

以上是针对铝合金镀镍废水处理中存在的主要问题,从废水分类原则、水质特征入手,分析了常规处理工艺存在的不足,结合实际工作的经验,提出了适用、可行的污染治理工艺及措施,以满足国家新颁布的《电镀污染物排放标准》(GB21900-2008)及相关要求。

## 参考文献

- [1] 谢金平,王红娟,彭峰.铝基上光亮化学镀镍工艺研究.广东化工,2005,14(1).
- [2] 黄晓梅,李宁,蒋丽敏,黎德育.铝及铝合金电镀的浸锌工艺.电镀与环保,2005,25(2).

(下接第 25 页)

- [9] 许秋瑾等.太湖藻类生长模型研究[J].湖泊科学,2001,13(2):149-156.
- [10] 毛晓敏,刘翔,Barry D A.PHREEQC 在地下水溶质反应-运移模拟中的应用[J].水文地质工程地质,2004,(2):20-24.
- [11] 逢勇,丁玲,高光.基于生态槽实验的藻类生长参数确定[J].环境科学,2005,26(3):78-82.
- [12] 丁玲,逢勇等.水动力条件下藻类动态模拟[J].生态学报,2005,25(8):1863-1868.

- [13] 逢勇.太湖地区大气-水环境的综合数值研究[M].北京:气象出版社,1998.
- [14] 苏玉萍等.环境因子对福建省山仔水库水华微囊藻生长的影响[J].植物资源与环境学报,2005,14(3):42-46.
- [15] 黄钰铃,刘德富,陈明曦.不同流速下水华生消的模拟[J].应用生态学报,2008,19(10):2293-2298.
- [16] 张哲海等.玄武湖蓝藻水华成因探讨[J].环境监测管理与技术,2006,18(2):15-18.