

简化活性污泥数学模型的优化

刘 芳, 顾国维

(同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 为了从控制运行的角度促进简化数学模型的应用, 必须借助其它优化手段进一步提高预测精度。本文主要介绍了应用于简化数学模型的扩展卡尔曼滤波、神经网络和误差反馈系统三种优化方法以及优化后的验证结果。从验证结果来看, 优化的 ROM 模型与 ASM 1 模型的定性变化行为相似, 基于神经网络的复合模型对 PO_4^{3-} 和 NO_x^- 的预测结果非常准确, 误差反馈的优化系统模拟性能良好。

关键词: 简化数学模型; 优化; 扩展卡尔曼滤波; 神经网络; 误差反馈系统

中图分类号: X11

文献标识码: A

文章编号: 1001- 2141(2003)08- 0040- 03

限于污水处理厂的设计、运行和水质检测的水平, 加上模型结构和参数的复杂性, 直接应用 IAWQ 数学模型具有一定的困难。为此, 学者们推出了一系列的简化数学模型模拟活性污泥工艺的主要反应过程, 在工艺的检测和控制方面取得了成功, 如 Jeppsson 推出的 ROM (Reduced order model) 模型^[1]、Johansson 推出的 SIPHOR 模型^[2]、Zhao 推出的 SPM (simplified process model) 模型^[3- 4] 和 Kim 推出的 SLM (simplified linear model) 模型^[5- 6]。这些模型或是简化反应机理(ROM 模型, SPM 模型), 或是简化模型结构(SLM 模型), 或将模型分成若干子模型(SIPHOR 模型)。

由于简化数学模型本身存在众多假设, 导致其在污水厂的运行控制中的精度不高。为了从控制运行的角度促进机理模型的应用, 必须借助其它优化方法进一步提高预测精度, 本文主要介绍了应用于简化模型的扩展卡尔曼滤波、简单信息反馈系统和神经网络三

种优化方法。

1 扩展卡尔曼滤波

1993 年, Jeppsson 在 ASM 1 模型的基础上推出了 ROM 模型, 该模型包含 4 个反应过程和 5 种组分。Jeppsson 通过模拟 A-O 系统的运行状况来验证 ROM 模型的有效性。ROM 模型的所有参数首先用卡尔曼滤波进行识别, 然后再用于验证模型。

污水厂的动力学模型一般表示为:

$$\frac{dX}{dt} = f(X, t) + g(u, t) \quad (1)$$

其中 X 是一矢量, 表示反应器中的五种组分, $g(u, t)$ 表示进水的输入信息。对于扩展卡尔曼滤波来说, 除了变量 X 外, 一些未知参数也需要根据测试数据进行调整。卡尔曼滤波分为两步: 预估和校正。图 1 表示了扩展卡尔曼滤波的识别过程。

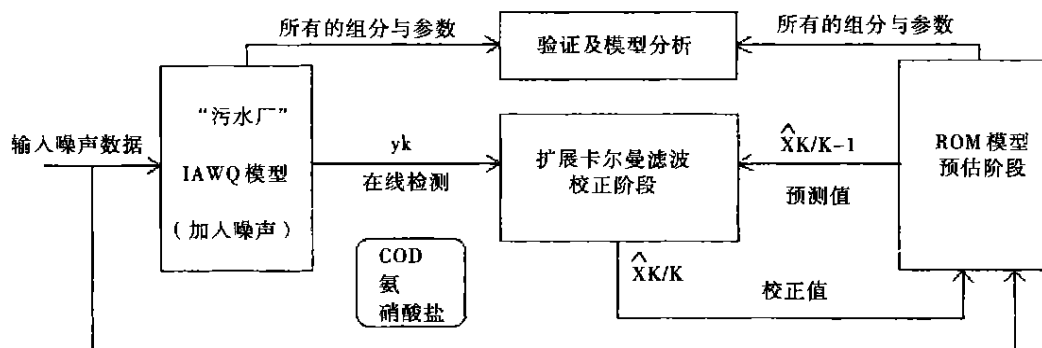


图 1 扩展卡尔曼滤波识别过程结构图

在预估阶段, 动力学公式由两部分测试结果组成, 从时间 t_{k-1} 到时间 t_k 。一些变量(如浓度)和参数需要测定到时间 t_{k-1} , 推出的变量(如未知参数)表示为 $o(X;$

收稿日期: 2002- 12- 04

作者简介: 刘芳(1976-), 女, 同济大学环境工程在读博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50138010)的子课题及上海市 2001~ 2003 重点学科建设的资助项目。

$\sup 3 (^{\wedge}) (t_k | t_{k-1})$, 然后组分浓度和参数根据时间 t_k 时的测试数据进行调整。第二步是校正, 在该阶段经调整后的变量表示为 $o(X; \sup 3 (^{\wedge}) (t_k | t_k))$, 然后根据式(2)进行计算。式中最后一项对应于 t_k 时的预测值, y 代表实测值。

$$X(k|k) = X(k|k-1) + K[y(k) - C \cdot X(k|k-1)] \quad (2)$$

卡尔曼滤波一般用于处理线性问题。为了计算系数 K 的值, 在每个测试点需要将动力学公式线性化。校正时, 由 t_k 时的线性方程求出 K 值。求出的 K 值不仅取决于线性状态, 还取决于影响组分和测试噪声的特性。当 K 值求出后, 就假设其恒定以简化计算步骤。此外, K 的取值还会影响参数变化的收敛速度。为了使模型在实际应用中具有较强的识别性能, 其它因素也要考虑进去, 如各组分浓度单位的一致性和试验工况等。

利用相同的进水数据, Jeppsson 将 ROM 的验证结果和 IAWQ 的验证结果进行了对比。从验证结果来看, 两个模型的定性变化行为相似, 但有机物浓度模拟值的差异较大。在 IAWQ 模型中, 有机物用 $X_{S+ S_s}$ 表示, 而在 ROM 中, 有机物则用 X_{COD} 表示, 这就意味着 ROM 模型中含有更多的有机质可直接供微生物生长(不经水解), 因此 COD 响应的振幅比 IAWQ 的低。两个模型中氮浓度的差异主要是由于 IAWQ 中自养菌增长的动力学反应式是非线性的, 而 ROM 作了线性近似, 因此当进水中氮的浓度升高时, ROM 模拟的硝化速率较高。

2 神经网络(NN)与 SPM 组成的复合模型

利用神经网络校正数学模型的输出与实际输出之间的误差是一种有效的方法。如果数学模型中的某些参数无法取得最优值, 可利用神经网络对其进行补偿; 如果模拟的结果误差过大, 可利用神经网络缩小预测值与实测值之间的误差; 对一些因素如温度、大气压等对污水处理系统的非线性影响可以用神经网络的记忆能力去补偿消除。

1997 年, Zhao 在理解 ASM 2 模型的基础上推出了 SPM 模型, 该模型包含 6 个反应过程和 5 种组分。Zhao 将神经网络并行引入到 SPM 中构成了一个复合模型, 其主要特性就是该模型融合了 SPM 与 NN 两者的优点, 既阐述了基本的反应过程, 又利用 NN 校正了 SPM 预测值产生的误差。图 2(a) 是一个复合模型的结构图。当利用复合模型模拟 SBR 系统的动力学过

程时, 首先需要向 SPM 中输入一些信息, 包括 COD、 PO_4^{3-} -P、TKN、 NH_4^+ -N、TN 以及时间控制信号。为了校正 SPM 可能产生的误差, 除了上述信息外, 一些外部干扰因素如 $T(^{\circ}C)$ 、pH 和 MLSS 也需要输入到神经网络中。所有输入到神经网络中的变量先根据它们的平均值进行调整, 然后再训练神经网络, 使之可以校正实测数据与 SPM 预测值之间的差异。

表 1 神经网络模型输入和输出项的定义

符号	定 义
$u_1(t)$	任意时刻进水 COD, mg/L
$u_2(t)$	任意时刻进水 NH_4^+ -N, mgN/L
$u_3(t)$	任意时刻进水 TKN, mgN/L
$u_4(t)$	任意时刻进水 TN, mgN/L
$u_5(t)$	任意时刻进水 PO_4^{3-} -P, mgP/L
$u_6(t)$	任意时刻的操作状态
$u_7(t)$	任意时刻 DO 的控制信号, 0/1
$u_8(t)$	任意时刻的温度 ($^{\circ}C$)
$u_9(t)$	任意时刻的 pH
$u_{10}(t)$	任意时刻的 MLSS, mg/L
$e_1(t)$	(PO_4 -P 的测试值) - (PO_4 -P 的 SPM 预测值), mgP/L, 任意时刻
$e_2(t)$	(NO_x -N 的测试值) - (NO_x -N 的 SPM 预测值), mgN/L, 任意时刻

图 2(b) 表示了神经网络模拟的误差。 $e(t)$ 表示当前误差, $e(t-1)$ 、 $e(t-2)$ 等表示先前误差, $u(t)$ 表示当前输入项, $u(t-1)$ 、 \dots 、 $u(t-n)$ 表示先前输入项, 通过该模型可以推测下一阶段的误差 $e(t+1)$ 。如果模型要长期进行预测, 系统则需要不断重复、循环, 图 2(c) 就是一个外部循环的网络模型。在实际应用时, 神经网络的输入和输出分别设定为 $U(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_{10}(t)]$ 与 $e(t) = [e_1(t), e_2(t)]$, 各项的含义均列于表 1 中。由于测试手段的局限性, Zhao 仅选择了 SBR 中 NO_x^- 和 PO_4^{3-} 的浓度作为复合模型的输出结果。复合模型的输出值(NO_x^- 和 PO_4^{3-} 的预测浓度)是 SPM 与 NN 各自输出值的累积。

Zhao 利用 SPM 和复合模型模拟了 SBR 系统两种工况下基质的去除过程。模拟结果表明: SPM 和复合模型都能对用来验证模型参数的测试数据提供比较理想的预测值, 此外复合模型对新的数据也可以提供理想的预测值, 但 SPM 预测的却不准确。

Zhao 还利用两个相同的试验装置, 在相同的工况条件下进行模拟试验, 并将出水中磷的实测数据与模型的预测值进行了对比。SPM 的预测值低于装置 No. 133 的实测数据, 而高于装置 No. 189 的实测数据。此外, 在两个试验装置中实测的 NO_x^- 的浓度与 SPM 的预测值也不吻合。相比之下, 复合模型对于 PO_4^{3-} 和 NO_x^- 的预测结果则要准确的多。这是因为 SPM 预测值产生的误差输入到神经网络后, 经过神经网络的训

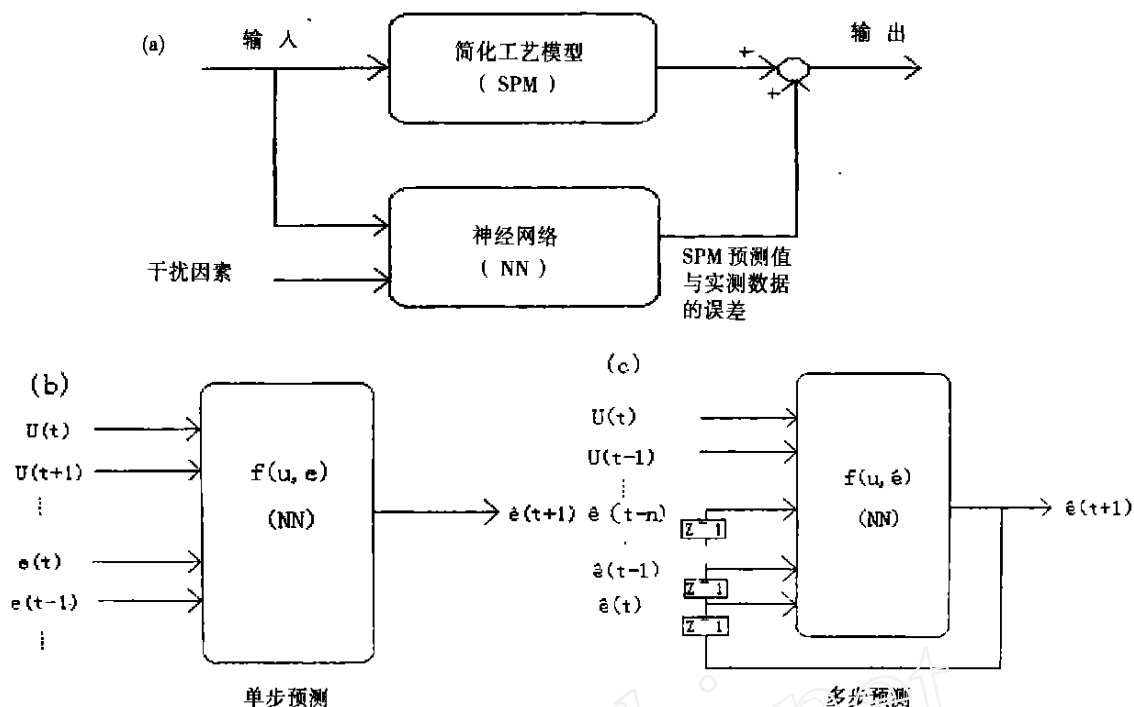


图 2 复合模型

练和联想过程,不断得到校正,最后输出的结果比较接近于实测数据。复合模型另外的一个重要特性就是即使运行状况发生变化,该模型也不需要频繁验证。例如,向原水中加入 $20\text{mg/L NH}_4^+\text{-N}$,复合模型仍能输出比较理想的结果,而 SPM 的输出结果却产生较大偏差。上述的研究证实,复合模型是一种有效的模拟工具,在实际操作中更具有应用价值。

3 误差反馈的优化系统

2001 年, Kim 在 ASM 2 模型的基础上推出了 SLM 模型,该模型的主要特点就是将每个反应速率表达式中的非线性双曲线部分做了线性简化,用变量“J”代替。Kim 利用误差反馈的优化系统在满足 PO_4^{3-} 排放标准的基础上控制曝气时间,优化 SBR 系统的运行费用。在优化时,假设反应期 DO 的浓度过于饱和,因此认为 DO 不是限制因素。

公式 (3) 表明 SLM 模型预测 PO_4^{3-} 的浓度 ($P_{\text{predicted}}$) 与一个优化系统结合在一起控制曝气时间。假设运行费用由曝气时间控制,其它能耗如泵站能耗、搅拌能耗均忽略不计。

$$M \ln \{ \text{cost} \} \quad (3)$$

t_{air}

满足: (1) $P_{\text{predicted}} \leq P_{\text{max}}$ (2) $t_{\text{air}} \geq t_1$ (3) $t_{\text{air}} \leq t_2$

式 (3) 中 P_{max} 是允许排放的 PO_4^{3-} 的最大日平均浓度或月平均浓度; t_1 和 t_2 分别为最小和最大曝气时

间, 设定为 $t_1 = 1\text{h}$ 和 $t_2 = 5\text{h}$ 。

图 3 表示了公式 (3) 所给出的优化系统。首先将 $P_{\text{predicted}}$ 和 P_{max} 输入到优化系统, 然后优化系统控制 t_{air} 以满足公式 (3) 给定的 3 个条件。由于 SLM 模型假设与简化的原因, 加上外部干扰, 公式 (3) 提供的数据在实际应用中可能不太精确, 因此为了使优化系统能够消除误差, 控制反应器的正常运行, 错误的信息还要反馈到优化系统中去。

此外, 为了使反馈信息具有可靠性, 并避免系统对参数的日变化的响应过于剧烈, Kim 又引入了 δ 校正因子。

$$\delta P_t = \alpha \times P_t + \beta \times \left\{ \alpha \times P_{t-1} + \beta \times [\alpha \times P_{t-2} + \beta \times (\dots)] \right\} \quad (4a)$$

$$\delta P_t = \alpha \times P_t + \beta \times \delta P_{t-1} \quad (4b)$$

式 (4) 中 δP_{t-1} 表示前一时段计算的误差值, α 与 β 是权重因子 ($\alpha + \beta = 1$), $\delta P_0 = 0$ 。如果 α 大于 β 说明优化系统对目前的数据比较敏感; 如果 β 大于 α 说明优化系统可以过滤目前数据的误差, 更依赖于过去的数据。

表 2 是 SBR 工艺按优化系统的设计运行 90d 后得出的模拟结果。根据验证结果得知, PO_4^{3-} 出水浓度的预测值与实测值之间的平均误差大约为 0.2mgP/L 。这个误差没有考虑由于空气压缩机的波动及 PO_4^{3-} 的冲击负荷 (大约为 0.1mgP/L) 所引起的 P 的变化。在正常情况下, 优化系统模拟性能良好。

(下转第 53 页)

建成后的运营期与环境的相互关系。

环境影响评价报告制度的历史与可行性研究报告相比要短很多, 环境影响评价报告所含内容的实用性还有待于进一步提高。例如, 针对可行性研究报告的不适内容, 在环境影响报告中应明确指出, 力争在初步设计时加以修订。审核建设项目的费用概算, 对环保设施的建设费用和运行费用合理分配与否应重点核对, 以防环保治理费用不足或漏项, 避免“三同时”的经费不能落实。这也是可行性研究报告比较薄弱的方面, 而恰恰又是对建设项目影响较大的因素。

(上接第 42 页)

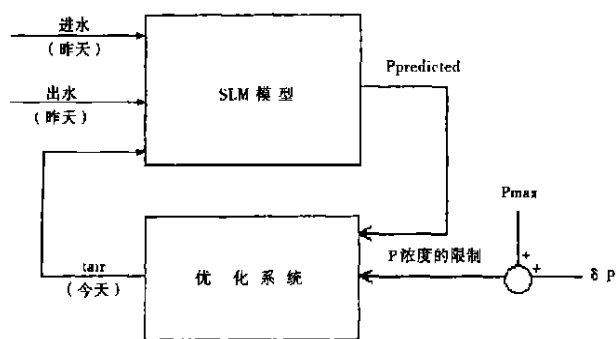


图3 优化的 SLM 模型

表2 SBR 系统运行的模拟结果

参 数	$\alpha=0.7$, $\beta=0.3$	$\alpha=0.5$, $\beta=0.5$	$\alpha=0.3$, $\beta=0.7$
平均曝气时间(h)	2.9	2.8	2.8
PO_4^{3-} 的平均出水浓度(mgP/L)	0.57	0.5	0.5
PO_4^{3-} 的出水浓度范围(mgP/L)	0~1.5	0~1.2	0~1.0

4 结论

由于整体 IAWQ 模型的复杂性, 许多学者推出了简化的活性污泥数学模型。这些模型或是简化反应机理(如 ROM 模型、SPM 模型), 或是简化模型结构(如 SLM 模型), 或将模型分成若干子模型(如 SIPHOR 模型)。各模型的验证结果表明, 简化模型从总体上能够较好的模拟反应系统的运行与控制。但由于简化和

6 参考文献

- 1 国务院(98)第 253 号令, 建设项目环境保护管理条例
- 2 中华人民共和国环境保护法(试行), 1979
- 3 (86)国环字 003 号文, 建设项目环境保护管理办法
- 4 国药综经字[1995]第 397 号文, 医药建设项目可行性研究报告内容深度的规定
- 5 化发计(1997)426 号文, 化工建设项目可行性研究报告内容和深度的规定
- 6 化发计(1992)994 号文, 合资经营化工建设项目可行性研究报告内容和深度的规定
- 7 国家环境保护总局开发监督司 环境影响评价技术原则与方法 北京: 北京大学出版社, 1992

近似的原因加上外部干扰因素, 简化模型的模拟数据与实测数据之间存在一些误差。为了消除模拟产生的误差, 可利用卡尔曼滤波、误差反馈系统和神经网络对简化模型进行优化。从验证结果来看, 经过优化后的模型更加准确地模拟了系统的运行, 降低了预测的相对误差。

5 参考文献

- 1 U. Jeppsson et al, Reduced Order Models for On-line Parameter Identification of the Activated Sludge Process, Wat Sci Tech, 1993, 28(11/12): 173~ 183
- 2 Per Johansson et al, Modeling of the Anaerobic Reactor in a Biological Phosphate Removal Process, Wat Sci Tech, 1996, 34(1/2): 49~ 55
- 3 Hong Zhao et al, Modeling Nutrient Dynamics in Sequencing Batch Reactor, Journal of Environmental Engineering, 1997, (4): 311~ 319
- 4 Hong Zhao et al, Approaches to Modeling Nutrient Dynamics: ASM 2, Simplified Model and Neural Nets, Wat Sci Tech, 1999, 39(1): 227~ 234
- 5 Hyunook Kim et al, SBR System for Phosphorus Removal: ASM 2 and Simplified Linear Model, Journal of Environmental Engineering, 2001, (2): 98~ 104
- 6 Hyunook Kim et al, SBR System for Phosphorus Removal: Linear Model Based Optimization, Journal of Environmental Engineering, 2001, (2): 105~ 111

· 简讯 ·

巫溪县加强三峡库区“消落区”生态环保工作

最近, 三峡水库消落区生态环境问题及对策研究课题组的专家带领巫溪县计委、环保、水利、旅游、移民等局到三峡库区巫溪县“消落区”进行了实地调研。针对该县“消落带”面积小、点位多、影响大的特点, 制定了切实可行的治理方案。一是在花台乡河滩上筑防护堤, 既有保护耕地、防止水土流失和垃圾处理场作用, 又有防护堤和码头、道路相结合的功能, 一举多得。

二是在面积较小的河滩、河岸上种植洗水植被, 利用生物工程护滩、护岸。三是对滑坡、泥石流等山地灾难, 采取修排水沟、混凝土板结等措施进行控制。四是对水土流失强度较大的点位, 采用造林、修路、修梯田等办法, 并结合退耕还林工程进行治理。

(杨海春)

balance of HRT and superficial velocities, the carry-out of Anaerobic Ammonium Oxidation and technics mending

Key words: Up-flow Anaerobic Sludge Bed; low strength wastewater of the lower temperature

Optimization of Simplified Activated Sludge Process Models

Liu Fang, Gu Guowei

(Pollution Control and Resources Research State Key

Laboratory, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: In order to promote the simplified activated sludge process models from the operation, the optimization must be used to enhance the simulation precision. The extended Kalman filter, the neural network, the simple errors feedback system and those simulation results were induced. The simulation results showed that the qualitative change behavior of the optimization ROM was similar to that of ASM1, the simulation results of PO_4^{3-} and NO_x^- of neural network were perfect and that the simulation performance of the simple errors feedback system was well.

Key words: simplified activated sludge process models; optimization; the extended Kalman filter; the neural network; the simple errors feedback system

Review On Spray Dryer Absorption Flue Gas Desulfurization Technology

Pan Zhaoqun

(South China University of Technology, Guangzhou 510641)

Abstract: Spray dryer flue gas desulfurization technology has been applied in China in these years. In this paper the process and the mechanism have been introduced; the relationship between the efficiency and the chemical ratio, near saturated temperature, inlet gas temperature, sulfur dioxide concentration have been analyzed in details. This new method gets advantages over more simple system, lower investment, less operational cost and the residue which is easier to deal with.

Key words: spray drying absorption; flue gas desulfurization

Relating the Situation of Food Safety and the Development of Green Food

Sheng Yiling

(Jinhua college of profession and technology,

Jinhua 321000)

Abstract: In the light of the action that many contraband are used on food production and processing, analyzing the present situation of food quality and safety, raising the feasibility and urgency for green food development. We are sure that green food must have wide development open space by the increasing of people's level.

Key words: food safety; green food; development prospects

Some Problems about Feasibility Report and Environmental Impact Assessment when Construction Project Carry Out

Zhao Kejun, He Liqun, Zhang Yong, Zhao Tongxin

(Xinjiang chemical engineering design&research institute, Urumqi 830006)

Abstract: Base the many years' work experience, the author analyse some problems about Feasibility report and Environmental impact assessment on Construction project, raises how make full use of Feasibility report about Construction project for Environmental impact assessment, and how make Environmental impact assessment accurate if there is no Feasibility report. In a word, one of the main aim of this article is to improve the quality of Environmental impact assessment and harmonize relation with Environmental impact assessment, prevent pollution from constructing.

Key words: construction project; environmental impact assessment; feasibility report; environmental protection

Investigation of the Distribution of the Aquatic Vegetation in Lake Donghu, Wuhan

Wu Zhenbin, Chen Deqiang, Qiu Dongru, Liu Baoyuan

(The State Key Laboratory of Fresh Water and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072)

Abstract: The investigation showed that there were 33 species aquatic plants belonged to 25 genus and 20 families in Lake Donghu. The distribution area of the aquatic plants was only 0.7 percent of the total area of the lake and the biomass was 1,137 ton. Compared to the data in 1957, 1962~1963 and 1988~1994, the aquatic vegetation in the lake has declined seriously, especially the submerged vegetation. The paper discussed the main reasons of declination of aquatic vegetation including the eutrophication, the excessive breeding of herbivorous fishes and the effect of human beings.

Key words: lake Donghu of Wuhan; aquatic vegetation; declination; evolution analysis