

## 水华预警模型研究进展

邢丽贞, 邱靖国, 王立鹏

(山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250101)

**摘要:**概述了国内外水华预警模型的研究和应用现状,分析了模型研究中存在的问题,指出综合运用地理信息系统(GIS)、遥感技术(RS)、计算机仿真技术、多媒体技术等,对水体预警因子进行实时监测与处理,建立更符合水体实际的多维动态水华预警模型,进一步提高预警模型的可靠性,是水华预警模型的研究方向。

**关键词:**水华;预警模型;预警因子;富营养化

**中图分类号:**Q949.2;X171

**文献标识码:**A

## Research on early warning model of algal bloom

XING Li-zhen, QIU Jing-guo, WANG Li-peng

(School of Municipal & Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

**Abstract:** Algal bloom early warning model can give us earlier warning of algal bloom before its breaking out by analyzing and estimating algae growth status, and provide scientific basis for algal bloom control. Early warning factors, are analyzed in this paper, such as nitrogen and phosphorus, pH value, dissolved oxygen (DO) and oxidation-reduction potential (ORP) and analyzed, at the same time, are an overview of the research and application status of algal bloom early warning model at home and abroad, as well as existing problems in the model study. Providing real-time monitor and processing of algal bloom early warning factors to build the multi-dimensional and dynamic algal bloom early warning models in line with the actual body of water by comprehensive use of geographic information system (GIS), remote sensing (RS), computer simulation technology and multimedia technology are applied to enhance the reliability of early warning model, which is supposed to be the research direction of algal bloom early warning model.

**Key words:** algal bloom; early warning model; early warning factors; eutrophication

根据各地多年的监测资料,近年来我国多数城市湖泊水体呈严重富营养化状态<sup>[1]</sup>。2007年,28个国控重点湖(库)中,V类的5个,占17.9%,劣V类的11个,占39.3%<sup>[2]</sup>。水体富营养化的重要特征就是发生水华。水华是当水体中出现富营养状况并具备适宜的温度、光照、气候及合适的水文条件等有利于藻类生长或聚集的环境条件时,水体藻类大量生长繁殖或聚集并达到一定浓度的现象<sup>[3]</sup>。水

华一旦发生,就会使水体透明度下降,溶解氧降低,水体出现黑臭等现象,而有些类型的水华还会产生藻毒素,给人类居住环境和人体健康造成损害。

水华的发生是突发性的,而水华一旦发生,控制难度就会加大,治理成本成倍提高,因此如果能够预见水华的发生并及时采取相应措施会取得事半功倍的效果。水华预警是水质预警中的一种突发型预警类别,是指在一定范围内,对藻类生长状况进行分

析、评价,对其未来发展状况进行预测。水华预警系统具有超前性预报的功能,能够提前预测出水质演化趋势、方向、速度和后果,在发生水华之前及早发出警报,为水华控制提供科学依据。

国内外对水华预警的研究主要围绕三个方面展开:(1)利用单变量或多变量营养指标对水体营养程度进行预测;(2)利用水质模型对水体富营养化程度进行模拟和预测;(3)利用地理信息系统或遥感系统对水华的发生进行预测。水华预警的方法有模糊评价法、人工神经网络、遗传算法、支持向量机(support vector machines, SVM)等,而神经网络方法由于具有较强的适应能力、学习能力和真正的多输入多输出系统的特点而受到人们的重视。

## 1 预警因子

对于一个确定的水体环境,藻类数量的某一个特定值,是对应了水体环境的某一个状态,这些状态值与藻类的生长需求密切相关,包括营养因子、环境因子和生态因子,例如 TN、TP、光照强度、pH 值、溶解氧、氧化还原电位等。因此藻类数量的变化可以在这些状态值的变化中表现出来。同时藻类数量的变化也是这些状态值综合作用的结果<sup>[4]</sup>。

水华的发生是由于许多因素如营养盐、水温、光照、pH 值、生物因素等共同作用的结果,发生时又有多种水质指针如 pH 值、溶解氧、氧化还原电位、氮磷浓度等同时发生变化,因此在水质预警模型中参数较多,在模型设计时需要在这些影响因素中筛选出合适的因素作为预警因子。一般选择那些受周围环境影响小的、适合于所选择的模型的、监测方便并且与藻类生长密切相关的这些因素作为预警因子。

在众多的影响因子中,氮磷及氮磷比、pH 值、DO 和 ORP 等都与藻类生长密切相关,且与藻类的生物量之间具有很好的相关性,可以作为预警因子。

### 1.1 氮磷及氮磷比

氮磷是藻类生长最重要的营养因子。氮磷及氮磷比与藻类的生长之间有很好的相关性。可以利用它们之间的这种相关关系建立预测模型,通过监测氮磷浓度来预测水华是否发生。

V. H. Smith<sup>[5]</sup>通过研究指出:对藻类生长来说,总氮质量浓度( $\rho_{\text{TN}}$ )与总磷质量浓度( $\rho_{\text{TP}}$ )之比

$\rho_{\text{TN}}:\rho_{\text{TP}}$ 在 20:1 以上时,表现为氮过量,磷为限制因子,藻种群密度高峰值主要受磷含量的影响;当  $\rho_{\text{TN}}:\rho_{\text{TP}}$  小于 13:1 时,表现为氮不足,氮成为限制因子,藻密度高峰值主要与氮含量有关。日本湖沼学者坂本研究发现,当湖水的  $\rho_{\text{TN}}:\rho_{\text{TP}}$  在 10:1 ~ 25:1 范围时,藻类生长与氮和磷的浓度存在直线相关关系。王志红等<sup>[6]</sup>通过研究初始总氮、总磷、氮磷比等营养因子对“水华”生物量的影响,发现当初始总氮质量浓度小于 2.0mg/L、初始总磷质量浓度小于 0.1mg/L 时,藻生长高峰值与总氮总磷质量浓度比之间具有良好的相关性,并提出了不同氮磷比值与对应藻类“水华”生物量回归模型,可以对藻类“水华”的生物量进行预测。钟卫鸿等<sup>[7]</sup>研究了 N、P 等对铜山源水库优势藻类(绿球藻和舟形硅藻)生长的影响,发现当 N/P 为 25 时,绿球藻生长量最高。杨广杏等<sup>[8]</sup>对里湖水体进行实地调查,分析水中浮游藻类叶绿素 a(chla)与氮磷营养盐含量,进行回归统计,发现它们之间是正相关关系,N、P 营养盐变化趋势与浮游藻类叶绿素 a 变化趋势相吻合。

### 1.2 pH 值

水体 pH 值与藻类生长关系密切。在碳源丰富的水体中,藻类光合作用影响缓冲体系,从而影响水体 pH 值。最常见的是藻类大量吸收  $\text{CO}_2$  引起水体 pH 上升,同时部分藻类对水体中有机酸的吸收和重碳酸盐的利用,也会引起 pH 的升高<sup>[9]</sup>;而藻类的呼吸作用产生的  $\text{CO}_2$  溶于水促进  $\text{H}^+$  的生成,会引起 pH 下降。水体酸碱度也会影响藻类的生长,例如碱性环境有利于藻类光合作用,因为碱性系统易于捕获大气中的  $\text{CO}_2$ <sup>[10]</sup>,因而较高的生产力往往出现在碱性水体中<sup>[11]</sup>。每种藻类都有其适合的 pH 值范围,因而 pH 不仅会影响藻类的生长繁殖速度,还会影响种类的演替。

刘春光等<sup>[12]</sup>研究了淡水藻类在不同 pH 下的生长情况和种类变化。研究表明,在 pH 8.0 ~ 9.5 的范围内,pH = 8.5 藻类生长状况最好,pH = 9.5 生长最差,表明藻类有适合其生长的 pH 值,且人为改变 pH 值会影响藻类的生长。王志红等<sup>[13]</sup>研究了水库水藻类生长过程中 pH 的变化,发现 pH 值随藻类数量的增长呈现出有规律的变化,并建立了藻类数量与 pH 之间的数学模型,可以通过监测 pH 来预测藻类的水华现象。游亮等<sup>[14]</sup>以北京什刹海原水作为培养对象,进行了一系列实验,研究水体

中 pH 的变化,并对实验过程中的 pH 与藻类生长情况进行相关性分析,发现它们之间的相关系数为 0.9312。这也说明了 pH 值与藻类生长关系非常密切,是一个合理的水华预警参数。

### 1.3 溶解氧(DO)和氧化还原电位(ORP)

水体中 DO 含量受多因素影响,例如水温、溶解离子、微生物等,而在富营养水体中,DO 则主要受生物过程的控制。当藻类数量上升到一定数量级时,其数量的多少、生命活动的旺盛程度对水体的 DO 变化起主导作用。氧化还原电位是反映介质(土壤、天然水、培养基等)氧化还原状况的一个指标,在湖泊形成水华期间表面水华会造成水体中溶解氧含量降低,氧化还原电位也会随之降低,从而改变藻类的生长环境<sup>[15]</sup>。

张民等<sup>[16]</sup>研究了铜绿微囊藻和栅藻在单培养和混合培养条件下降低氧化还原电位对两种藻的影响,结果表明单培养下,降低氧化还原电位对两种藻的生长速率没有影响;在混合培养条件下,降低氧化还原电位提高了铜绿微囊藻的生长速率,而降低了栅藻的生长速率。同时试验也发现,ORP 降低使得铜绿微囊藻体积变大,生理参数发生改变,有可能是铜绿微囊藻迅速增值的原因。S. Marsili-Libelli<sup>[17]</sup>对 Orbetello 礁湖的为期一年的监测数据进行分析,比较了春季和冬季的两个变量的每日变化情况,发现在春季的时候 DO 和 ORP 在每天的不同时段变化很大,呈现周期的变化趋势;而在冬季 DO 和 ORP 在每天的不同时段变化不大。由此得出这样的结论:在春季的时候水体温度上升,藻类开始复苏,水体中藻类数量不断增加,藻类的生长影响了 DO 和 ORP,使之呈现周期性的变化趋势。冬季水温低,水体中藻类非常少,使得 DO 和 ORP 的变化不是很明显。同时说明,DO、ORP 和藻密度是相互影响的,因此可以通过检测 DO、ORP 数据来对藻类的数量进行预测。

## 2 国外水华预警模型研究进展

上世纪 70 年代湖泊学家们通过建立简单的磷负荷模型,用于评价、预测湖泊水体的营养状态。这类模型的典型代表是加拿大湖泊专家 Vollenweider 提出的 Vollenweider 模型<sup>[18]</sup>。

Vollenweider 模型假定,湖泊中随时间而变化的

总磷浓度值等于单位容积内输入的磷减去输出的磷及其在湖内沉积的磷,即:

$$H \frac{dP(t)}{dt} = L_s(t) - V_s P(t) q_s P(t) \quad (1)$$

式中:  $H$  为湖泊平均水深,  $H$  = 体积/表面积, m;  $P(t)$  为  $t$  时刻实际水体中磷的质量浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $L_s$  为单位面积输入湖泊的总磷负荷,  $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;  $V_s$  为沉降速度,  $\text{m}/\text{a}$ ;  $q_s$  为单位面积的出流量,  $\text{m}/\text{a}$ 。

至 80 年代,随着对水华和富营养化研究的不断深入,不少专家建立了一系列藻类生物量与营养物质负荷量之间的相关经验模型,其中比较经典的有 Rast 和 Lee 的经验模型<sup>[19]</sup>:

$$\lg Chla = 0.761gP - 0.259 \quad (2)$$

$$\lg H_t = -0.437 \lg Chla + 0.803 \quad (3)$$

式中:  $Chla$  为叶绿素 a 的浓度;  $P$  为总磷浓度;  $H_t$  为水体透明度。

这类经验模型简单直观,使用方便,但都假定水体混合均匀、稳态,且限制性营养物质是唯一的,与实际情况往往有较大差别,更不能反映藻类生长的机理。

进入 90 年代后,国外出现了更多对湖泊藻类的预测模型,较有名的有 PACGAP 类型即藻类种群生长和生产力的预测模型和 PROTECH-2 类型即浮游植物与环境因子关系模型<sup>[20-22]</sup>,以及由美国国家环境保护局提出一种多参数综合水质生态模型(water quality analysis simulation program, WQASP)<sup>[23]</sup>。

此后,越来越多的有针对性的水华预警模型被建立并得到成功应用。Scardi 和 Harding<sup>[24]</sup>研究美国东部的切萨皮克海湾(Chesapeake Bay)的富营养化问题时,采用多层传感器,运用概括方法构造了两个人工神经网络模型,对处于富营养化的初级生产力进行了成功预测。Bin Wei<sup>[25]</sup>等建立了 Kasumigaura 湖的多因子水质关系模型,利用人工神经网络成功预测到了几种主要优势藻微囊藻(*Microcystis*)、席藻(*Phormidium*)和杆针藻(*Synedra*)的爆发。

Friedrich Recknagel 等<sup>[26]</sup>根据 12 年以上的环境监测资料,利用神经网络建立了四个系统的淡水水华预测模型,对藻类发生的时间、数量级等的成功预测显示该类模型对复杂的非线性的生态现象进行预测的准确率达到了很高的程度。此外, Nitin Muttill, Joseph H. W. Lee<sup>[27]</sup>运用遗传算法对香港铜锣湾 3

年的叶绿素 a、溶解氧和气象水文资料建立实时预测模型进行水华超前预测,也得到令人满意的效果。S. Marsili-Libell<sup>[17]</sup>利用 15 个月的水质监测值(每日溶解氧(DO)、pH 值、氧化还原电位(ORP)和温度等)的变化来预测水华发生的可能性,运用模糊评价的方法建立了 Orbetello 湖的水华预警模型,进行了成功的水华预测。

### 3 国内水华预警模型应用研究

国内对水华预警的研究起步较晚。近年来随着水体水质的恶化及不断发生的严重水污染事件,人们对环境问题越来越重视。国内对水质预报的研究工作已经全面展开,但更多着眼于大流域的水质预警和湖泊的综合水质预报。

朱继业等<sup>[28]</sup>在研究物元分析理论的基础上,运用综合评判模型对南京市秦淮外河进行综合水质评定,并建立回归预警模型进行综合水质预报,在实际应用中取得了较满意的结果。董志颖等<sup>[29]</sup>采用模糊综合评判法对吉林地区的潜层地下水水质进行预警评价后,结合 GIS 系统得出了该地区的水质预警结果图。王东云等<sup>[30]</sup>运用多层前馈神经网络模型和 B-P 算法,对我国某海域的水质富营养化水平进行了评价,只要将观测结果提供给网络,模型可自动将评价结果输出。刘载文等<sup>[31]</sup>利用算法改进型的 BP(back propagation)神经网络,选择叶绿素含量、磷、氮磷比、电导率和水温五个参数作为模型输入,以预测 1d、3d 和 5d 后的叶绿素含量为目标,构建了北京市长河水系水华短期预报系统,对该水系三个周期的预测精度分别达到了 97.2%、94%、88.3%。王洪礼等<sup>[32]</sup>利用支持向量机理论对海水水质富营养化的程度进行评价,并与 BP 人工神经网络方法所得结果进行比较,发现 SVM 理论能更好地解决小样本的分类评价问题,评价效果良好,在水质评价领域有较好的应用前景。

韩涛等<sup>[33]</sup>以 MATLAB 为工具,建立了评价湖泊水体富营养化状态的 BP 神经网络模型,应用此模型对我国 9 个湖泊富营养化程度进行评价。通过对比用分级评分法、模糊数学法、Fuzzy-Grey 决策法(F-G 决策法)的评价结果,BP 神经网络的评价结果更为准确。由于采用了足够多的学习样本对网络进行了训练,最大限度地避免了人为主观因素的影响,

并经过样本的检验证明了网络具有很强的泛化能力,所以其评价结果更客观、可靠。曾勇等<sup>[34]</sup>采用决策树方法和非线性回归方法建立湖泊水华预警模型。应用决策树方法预测水华爆发时机,非线性回归方法预测水华爆发强度。以北京“六海”为例,利用分段线性多元统计回归预测公式,建立了三个由叶绿素 a、水量  $Q$ 、水温  $T$  以及总磷 TP 组成的回归方程。通过这几个回归方程来计算叶绿素 a 的含量,从而达到预测水华的目的。

近年来,随着科技的发展,更多的高新技术应用于水质预警中。GIS、RS 应用比较广泛并取得了良好的效果。窦明等<sup>[35]</sup>综合运用 GIS、RS、网络、多媒体及计算机仿真等现代高新科技手段,对汉江流域的地形地貌、水质状况、生态环境、水资源分布等各种信息进行动态监测与处理,建立全流域水质基础信息平台、不同功能的水质模型及其相应的管理系统。汉江水质预警系统具备对汉江水质实时监控、水污染事故应急响应、水资源优化调度和水环境综合管理等功能。朱灿等<sup>[36]</sup>以 GIS 和数据库管理系统(DBMS)为开发平台,建立了数字西江水质预警预报系统,在发生水污染突发事故后,能够快速预报污染物向下游的扩散时间、扩散面积、确定污染范围、污染程度及对下游取水口等所造成的影响,为决策部门提供决策支持。丰江帆等<sup>[37]</sup>针对太湖的蓝藻爆发引起的太湖水质不断恶化,结合预警模型和 GIS 技术以太湖历年来的连续监测资料为基础,运用多元逐步回归统计方法,选择水温等多项环境理化因素与叶绿素 a、藻类生物量、蓝藻生物量等生物因素进行逐步回归分析,建立起多元逐步回归方程,对太湖藻类生物量的变化情况进行预测预报。

### 4 存在问题及研究方向

近 20 年来,富营养化模型和水华预警模型得到了很大发展:状态变量由最初的几个发展到几十个;水体维数由一维稳态发展到多维动态;研究角度由简单的营养盐吸收发展到对生态系统分析模拟;研究对象由单一的藻类生长模拟发展到综合考虑水体的动力学、热力学及生物动态过程等。但是,在建模过程中仍存在许多问题:

(1)建模所依据的数据量不足,缺乏统一详细的水体水化学方面的数据,这给模型的校正、验证造

成很大困难,降低了水华预警模型的可靠度和适用性。

(2)模型缺乏真正生态系统所具有的灵活性,不能实时模拟环境的突变,因而预测结果不能反映水体生态系统的真实性。

(3)模型的模拟对象主要是营养盐的循环、浮游植物的生长和死亡的动态过程,水华预警模型在整个生态系统中非常独立,没有形成一整套水体管理决策支持体系。

为了克服上述问题提出了一些新的方法。例如:用模糊数据方法克服数据量不足的问题,用人工智能方法进行参数估计,用混沌与分形理论增强参数估计的能力,用灾变理论模拟系统结构变化,建立生态参数数据库,使用目标函数等。

富营养化模拟的发展趋势以学科相互渗透与交错为主,如水体物理环境与藻类生态行为相结合,藻类生态学与分子生物学相结合。富营养化模型也将从单一的预测和评价发展成为多目标管理优化模型<sup>[38]</sup>。随着新技术的发展,一些新的研究思路和技术也开始逐渐应用到水体富营养化模型中,比如在模型中综合考虑社会学、经济学和心理学因素,结合人工智能方法或GIS技术,从而使模型的适用性和可靠性得到进一步加强。

综合运用GIS、RS、计算机仿真技术、多媒体技术等,对水体预警因子进行实时监测与处理,建立更符合水体实际的多维动态水华预警模型,进一步提高预警模型的可靠性,是水华预警模型研究的方向。

#### 参考文献:

- [1] Laws E A. 水污染导论[M]. 北京:科学出版社,2004. 135 - 149.
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 2007年中国环境状况公报[EB/OL]. <http://www.sepa.gov.cn/plan/zkgb/2007zkgb>, 2008 - 11 - 17.
- [3] 郑建军,钟成华,邓春光. 试论水华的定义[J]. 水资源保护, 2006, 22(5): 45 - 47.
- [4] 周群英,高廷耀. 环境工程微生物学[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
- [5] Smith V H. Nutrient dependence of primary productivity in lakes[J]. Limnology Oceanography, 1979, 24(6): 1051 - 1064.
- [6] 王志红,崔福义,安全,等. 营养因子与藻生物量的回归模型[J]. 广东工业大学学报, 2005, 22(2): 26 - 30.
- [7] 钟卫鸿,单剑峰,薛凌,等. 氮和磷对铜山源水库优势藻生长影响实验研究[J]. 环境污染与防治, 2003, 25(1): 20 - 22.
- [8] 杨广杏,李适宇,李耀初. 里湖浮游藻类与氮、磷营养盐的相关性[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1998, 37(S2): 204 - 207.
- [9] 陈明耀. 生物饵料培养[M]. 北京:中国农业出版社, 1995. 56 - 57.
- [10] Imhoff J F, Sahl H G, Soliman G S H, et al. The Wadi Natrun: chemical composition and microbial mass developments in alkaline brines of eutrophic desert lakes[J]. Geomicrob J, 1979, 1(3): 219 - 234.
- [11] Melack J M. Photosynthetic activity of phytoplankton in tropical African soda lakes[J]. Hydrobiology, 1981, 81(1): 71 - 85.
- [12] 刘春光,金相灿,孙凌,等. pH值对淡水藻类生长和种类变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 294 - 298.
- [13] 王志红,崔福义,安全,等. pH与水库水富营养化进程的相关性研究[J]. 给水排水, 2004, 30(5): 37 - 41.
- [14] 游亮,崔莉凤,刘载文,等. 藻类生长过程中DO、pH与叶绿素相关性分析[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(9): 42 - 44.
- [15] Mozelaar R, Stal L J. Fermentation in the unicellular cyanobacterium *Microrcytis* PCC7806[J]. Archiv Fur Hydrobiologie, 1994, 162(1/2): 63 - 69.
- [16] 张民,孔繁翔,史小丽,等. 铜绿微囊藻在竞争生长条件下对氧化还原电位降低的响应[J]. 湖泊科学, 2007, 19(2): 118 - 124.
- [17] Marsili-Libelli S. Fuzzy prediction of the algal blooms in the Orbetello lagoon[J]. Environmental Modelling & Software, 2004(19): 799 - 808.
- [18] Vollenweider R A. Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology[J]. Schweizerische Zeitschrift Hydrol, 1975, 37(1): 53 - 841.
- [19] 李炜. 环境水力学进展[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社, 1999.
- [20] Ferguson A J D. The role of modelling in the control of toxic blue-green algae[J]. Hydrobiologia, 1997, 349(130): 1 - 4.
- [21] Seip K L. The ecosystem of a mesotrophic lake-I. Simulating plankton biomass and the timing of phytoplankton blooms[J]. Aquatic Sciences, 1991, 53(2/3): 239 - 262.
- [22] Frisk T, Bilaletdin A, Kaipainen H, et al. Modelling phytoplankton dynamics of the eutrophic Lake Vortsjav, Estonia[J]. Hydrobiologia, 1999, 414: 59 - 69.
- [23] Ambrose R B, Wool T A, Connouy J P, et al. WASP4, a hydrodynamic and water quality model theory, user's manual, and programmer's guide[D]. Athens, GA: U S Environmental Protection Agency, 1988.
- [24] Scardi M, Harding L W. Developing an empirical model of phytoplankton primary production: a neural network case study[J]. Ecological Modelling, 1999, 120(2/3): 213 - 223.
- [25] Wei B, Sugiura N, Maekawa T. Use of artificial neural network in the prediction of algal blooms[J]. Wat Res, 2001, 35(8): 2022 - 2028.

(下转第275页)

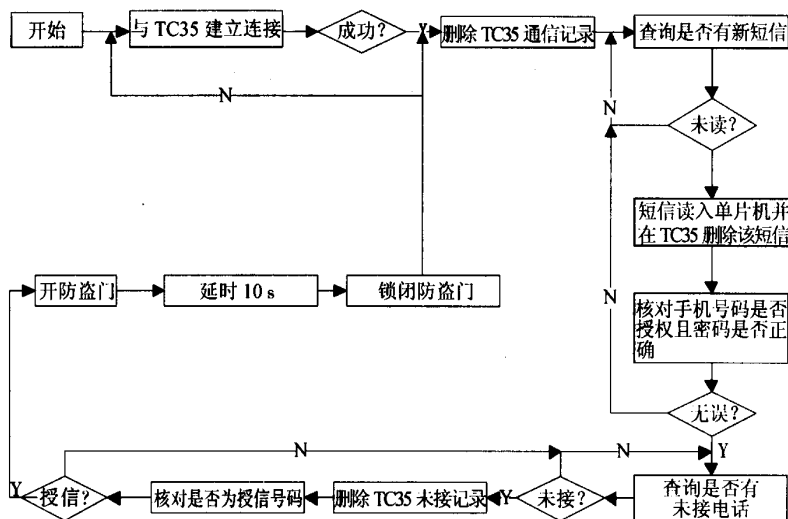


图5 系统程序流程框图

### 3 总结

利用 GSM/CDMA 网络的无缝覆盖和 SMS 短信信息的廉价快捷可实现对家居防盗门的远程控制,开锁的两个条件缺一不可,即使犯罪分子窃取了开锁密码但得不到授信手机也望洋兴叹。这种设计方案是现代科技发展的产物,具有产品推广的可行性,相关的专利正在申请中。

#### 参考文献:

- [1] 吴飞清,李林功,马修木. TC35 在温室环境信息监控中的应用[J]. 自动化仪表,2008(8):41-44.
- [2] 胡汉才. 单片机原理及其接口技术[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [3] 李志伟. 基于 AT 指令的串行通信程序的设计[J]. 微计算机信息,2007,26(3-3):272-274.
- [4] 谢少波. 单片机控制 TC35 的短信群发[J]. 电子技术,2006(6):72-73.

(上接第 271 页)

- [26] Recknagel F, French M. Artificial neural network approach for modelling and prediction of algal blooms[J]. Ecological Modelling, 1997, 96(1/3):11-28.
- [27] Muttill N, Lee J H W. Genetic programming for analysis and real-time prediction of coastal algal blooms[J]. Ecological Modelling, 2005, 189(3/4):363-376.
- [28] 朱继业, 窦贻位, 方红松. 动态系统物元模型在综合水质预报中的研究和应用[J]. 城市环境与城市生态, 1999, 12(1):51-54.
- [29] 董志颖, 汤洁, 杜崇. 地理信息系统在水质预警中的应用[J]. 水土保持通报, 2002, 22(1):60-62.
- [30] 王冬云, 黄焱歆. 海水富营养化评价的人工神经网络方法[J]. 河北建筑科技学院学报, 2001, 18(4):27-29.
- [31] 刘载文, 杨斌, 黄振芳, 等. 基于神经网络的北京市水体水华短期预报系统[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(28):243-245.
- [32] 王洪礼, 王长江, 李胜朋. 基于支持向量机理论的海水水质富营养化评价研究[J]. 海洋技术, 2005, 24(1):48-51.
- [33] 韩涛, 李怀恩, 彭文启. 基于 MATLAB 的神经网络在湖泊富营养化评价中的应用[J]. 水资源保护, 2005, 21(1):24-26.
- [34] 曾勇, 杨志峰, 刘静玲. 城市湖泊水华预警模型研究——以北京“六海”为例[J]. 水科学进展, 2007, 18(1):79-85.
- [35] 窦明, 李重荣, 王陶. 汉江水质预警系统研究[J]. 人民长江, 2002, 33(11):38-40.
- [36] 朱灿, 李兰, 董红, 等. 基于 GIS 的数字西江水质预警预报系统设计及应用[J]. 中国农村水利水电, 2006(10):9-12.
- [37] 丰江帆, 张宏, 徐洁, 等. 基于 GIS 的太湖蓝藻预警系统研究[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(9):60-61.
- [38] Somlyódy L. Eutrophication modeling, management and decision making: the KIS-balaton case[J]. Water Science and Technology, 1998, 37(3):165-175.