



(10)授权公告号 CN 106295121 B

(45)授权公告日 2019.01.18

(21)申请号 201610594828.3

(22)申请日 2016.07.21

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 106295121 A

(43)申请公布日 2017.01.04

(73)专利权人 天津大学

地址 300072 天津市南开区卫津路92号

(72)发明人 成龙 彭森 杨立焜 吴卿
赵新华(74)专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代
理事务所 12201

代理人 宋洁瑾

(51)Int.Cl.

G06Q 10/04(2012.01)

(续)

(56)对比文件

CN 102807301 A, 2012.12.05,

CN 104155423 A, 2014.11.19,

Likun Yang et al. A case study of an
enhanced eutrophication model withstoichiometric zooplankton growth sub-
model calibrated by Bayesian method.《Environmental Science & Pollution
Research》.2016,第23卷(第9期),8398-8409.祝慧娜.基于区间型贝叶斯的湖泊水质评价
模型.《监测与评价》.2016,第33卷(第2期),130-
134.K.EHavens et al.Nutrient dynamics and
the eutrophication of shallow lakes
Kasumigaura (Japan), Donghu (PR China),
and Okeechobee (USA).《Environment
Pollution》.2011,第111卷(第2期),263-272.

(续)

审查员 宋海荣

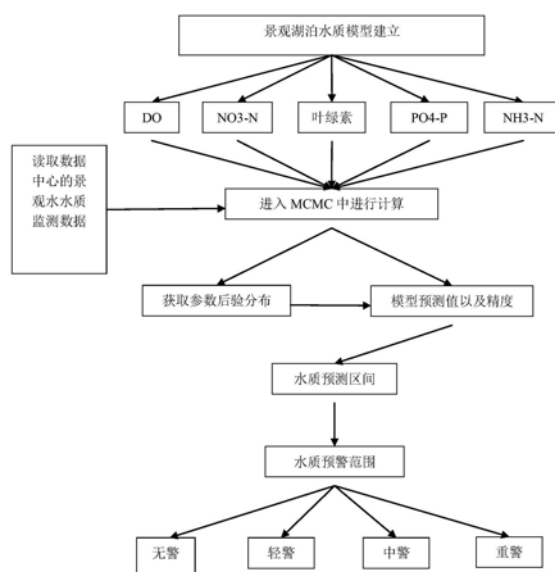
权利要求书1页 说明书7页 附图2页

(54)发明名称

景观湖泊贝叶斯水质风险预测方法

(57)摘要

本发明的景观湖泊富营养化风险预测方法,通过联合使用动态模型方程和贝叶斯统计方法建立了景观湖泊富营养化风险概率预测模型。经验证,该模型预测精度良好(精确度高于80%),从而使研究人员在面临景观湖泊入水水质变化时,可以及时、准确地预测景观湖水富营养化风险。通过比较不同入水下景观湖水水质预测分布情况,指出氮和磷营养盐浓度是影响景观湖泊富营养化风险的主要因素,结合风险计算,初步拟定了不同入水景观湖富营养风险等级的应对措施,使景观湖泊在面临富营养风险时,可以采取合理措施保证景观湖泊水质,降低富营养化引发的藻类爆发。本发明对景观湖泊水质管理也可以提供一定参考。



[转续页]

[接上页]

(51)Int.Cl.

G06Q 50/26(2012.01)

G06N 7/00(2006.01)

(56)对比文件

Weitao Zhang et al.Predicting the Frequency of Water Quality Standard Violations Using Bayesian Calibration of Eutrophication Models.《Journal of Great Lakes Research》.2008,第34卷(第4期),698-720.

George B.Arhonditsis et al.Eutrophication risk assessment using

Bayesian calibration of process-based models Application to a mesotrophic lake.《Ecological Modelling》.2007,215-229.

陈益.三峡库区环境水质监测管理信息系统的设计和研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库(电子期刊)信息科技辑》.2011,第2011年卷(第4期),第4-5章.

Likun Yang et al.Integration of Bayesian analysis for eutrophication prediction and assessment in a landscape lake.《《Environmental Monitoring & Assessment》.2014,第187卷(第1期),1-19.

1. 一种景观湖泊富营养化风险贝叶斯模型预测方法,其特征在于,包括如下步骤:

(1) 进行数据监测和采集;

(2) 通过通讯系统将数据传输到服务器上;

(3) 通过联合景观湖泊富营养化动态模型方程和贝叶斯方法建立景观湖泊富营养化风险不确定性预测模型;

(4) 读取服务器数据库中存储的相应监测数据,并将监测数据输入水质模型,对景观湖水体富营养风险进行预测、分析和决策支持,包括以下步骤:

(a) 根据不同入水浓度分布下监测到的进水氨氮、硝态氮、磷酸盐、叶绿素和溶解氧浓度来判断对景观湖泊富营养风险概率;将入水浓度情况,带入景观湖泊富营养化风险不确定性预测模型,预测未来一段时间内水质变化情况,获取模拟均值和上下95%置信值;

(b) 以《地表水环境质量标准》水质指标限值为依据,将估计的整个预测值在标准内各类水质分布的概率作为预警强度划分的依据,通过使用指标限值的量 Δ 作为预警强度划分的依据;其中指标限值的量 Δ 是指:

若区间估计的上限值大于相应的指标限值,而区间估计的下限值小于指标限值,则:

$$\Delta = \left(\alpha + \frac{l_1 - l}{l_1 - l_2} \right) \times 100\%$$

其中, l_1 和 l_2 分别为标准内各类水质上下限值, l 为模型预测出来相应水质指标浓度; α 为参数:当预测值为I类水体数值为0,II类水体数值为20,III类水体数值为40,IV类水体数值为60,V类水体数值为80;

若区间估计的下限值大于V类水质指标限值,则: $\Delta = 100\%$;

(c) 将95%上下置信值和均值分别作预警强度计算,获得一个预警强度范围。

2. 根据权利要求1所述景观湖泊富营养化风险贝叶斯模型预测方法,其特征在于,对于进水水质有周期性波动的景观湖,在建立模型时,选取的样本监测数据要具备周期性变化的特征,即选取一个完整水质变化周期内的样本监测数据进行建模,以保证模型模拟结果的稳定可靠。

3. 根据权利要求1所述的景观湖泊富营养化风险贝叶斯模型预测方法,其特征在于,所述步骤(1)须监测和采集的指标包括:氨氮、硝态氮、磷酸盐、叶绿素和溶解氧浓度。

景观湖泊贝叶斯水质风险预测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种景观湖泊富营养化风险预测方法建立,特别是涉及一种可以为景观湖泊入水水质提供依据,使用贝叶斯方法对景观湖泊富营养化风险进行预测的方法。

背景技术

[0002] 富营养化通常作为大量污染物排入水体导致有机物质加速产生的过程(尤其藻类)富营养化在全世界江河湖海中越来越严重并导致水环境恶化,尤其景观湖水体尤为严重。为了防止富营养化导致的浮游植物大爆发,对景观湖水体的评估和管理非常重要。在景观湖水体评估管理中机理模型用于解释生态过程,预测景观湖水环境因外来营养物质引起的改变,最后为政策制定做参考。然而传统模型运算忽略了模型参数的不确定性,将模型参数作为固定值进行校验,传统模型进行预测容易导致精度不高的现象发生。所以为了模型预测运算实现更加好的精度,必须考虑模型结构和参数中的不确定性因素影响。这样的模型才能容易的被决策制定者和政策规划人员利用。

发明内容

[0003] 为了解决现有技术中存在的问题,本发明提供一种景观湖泊贝叶斯水质风险预测方法,克服现有技术中景观湖水体评估管理中机理模型预测不准确的问题。

[0004] 本发明的技术方案是:一种景观湖泊富营养化风险贝叶斯预测模型方法,包括如下步骤:

[0005] (1) 进行数据监测和采集;

[0006] (2) 通过通讯系统将数据传输到服务器上;

[0007] (3) 通过使用景观湖泊富营养化动态模型和贝叶斯统计方法建立景观湖泊富营养化风险不确定性预测模型;

[0008] (4) 读取服务器数据库中存储的相应监测数据,并将监测数据输入水质模型,对景观湖水体富营养风险进行预测、分析和决策支持。

[0009] 对于进水水质有周期性波动的景观湖,在建立模型时,选取的样本监测数据要具备周期性变化的特征,即选取一个完整水质变化周期内的样本监测数据进行建模,以保证模型模拟结果的稳定可靠。

[0010] 所述步骤(1)须监测和采集的指标包括:氨氮、硝态氮、磷酸盐、叶绿素和溶解氧浓度。

[0011] 所述的步骤(4)对景观湖水体富营养风险进行预测、分析和决策支持包括以下步骤:

[0012] (1) 根据不同入水浓度分布下监测到的进水氨氮、硝态氮、磷酸盐、叶绿素和溶解氧浓度来判断对景观湖泊富营养风险概率;将入水浓度情况,带入景观湖泊富营养化风险不确定性预测模型,预测未来一段时间内水质变化情况,获取模拟均值和上下95%置信值;

[0013] (2) 以《地表水环境质量标准》水质指标限值为依据,将估计的整个预测值在标准

内各类水质分布的概率作为预警强度划分的依据,通过使用指标限值的量 Δ 作为预警强度划分的依据;

[0014] (3) 将95%上下置信值和均值分别作预警强度计算,获得一个预警强度范围。

[0015] 所述步骤(2)指标限值的量 Δ 是指:

[0016] 若区间估计的上限值大于相应的指标限值,而区间估计的下限值小于指标限值,则:

$$[0017] \quad \Delta = \left(\alpha + \frac{l_1 - l}{l_1 - l_2} \right) \times 100\%$$

[0018] 其中, l_1 和 l_2 分别为标准内各类水质上下限值, l 为模型预测出来相应水质指标浓度; α 为参数:当预测值为I类水体数值为0,II类水体数值为20,III类水体数值为40,IV类水体数值为60,V类水体数值为80。

[0019] 若区间估计的下限值大于V类水质指标限值,则: $\Delta = 100\%$ 。

[0020] 本发明的有益效果为:本发明的景观湖泊富营养化风险预测方法和系统,通过联合使用动态模型方程和贝叶斯统计方法建立了景观湖泊富营养化风险概率预测模型。经验证,该模型预测精度良好(精确度高于80%),从而使研究人员在面临景观湖泊入水水质变化时,可以及时、准确地预测景观湖水富营养化风险。通过比较不同入水下景观湖水质预测分布情况,指出氮和磷营养盐浓度是影响景观湖泊富营养化风险的主要因素,结合风险计算,拟定了不同入水景观湖富营养风险等级的应对措施,使景观湖泊在面临富营养风险时,可以采取合理措施保证景观湖泊水质,降低富营养化引发的藻类爆发。本发明可以为景观湖泊水质管理提供参考。

附图说明

[0021] 图1是本发明的景观水水质在线预警方法的原理结构示意图;

[0022] 图2是本发明的景观水水质预测预警部分的运行流程图。

具体实施方式

[0023] 下面结合实施例和附图对本发明的景观湖富营养化风险预测方法做出详细说明。

[0024] 本发明的景观湖富营养化风险预测方法,包括如下步骤:

[0025] 1) 进行数据监测和采集,是由若干个遥测远传终端组成,用于采集景观湖进、出水监测点的相关理化指标数据。须监测和采集的指标包括:氨氮、硝态氮、磷酸盐、叶绿素和溶解氧浓度;

[0026] 2) 通过通讯系统将数据传输到服务器上;该数据库中按时序存储了在线监测到的理化指标数据以及工艺基本情况。建立服务器用于控制数据监测和采集系统对景观湖进、出水监测点理化指标进行循环数据采集,将采集数据存储到数据库中并进行操作与分析;服务器可随时操作数据库中的数据,如进行存储/读取,以图表方式显示数据等。

[0027] 2. 景观湖泊贝叶斯水质风险预测方法,包括:

[0028] (1) 建立景观湖泊水质模型主要水质模型,主要模型方程见下:

[0029]

$$\frac{dChla_i}{dt} = growth_i \times Chla_i - resmp_i \times e^{kt(Tx - Tempref)} \times Chla_i - filter_i \times e^{ktfilt(Tx - Tempref)} \times Chla_i - \sum_j Grazing_j \times ftemperature \times ZOOP_j - (Vsettling_i \times Chla_i) / z \quad (1)$$

[0030]

$$\frac{dPO_4}{dt} = - \sum_i \left[\varphi_{PO_4} \times growthmax_i \times flight_i \times ftemperature_i \times P / C_{PHYT_i} \times Chla_i \right. \\ \left. - \alpha_{PO_4_i} \times resmp_i \times e^{kt(Tx - Tempref)} \times P / C_{PHYT_i} \times Chla_i \right] \\ + \sum_j \alpha_{PO_4_j} \times resmz_j \times e^{kt(Tx - Tempref)} \times P / C_{zoop_j} \times ZOOP + KPmine \times OP + PO_4 loading \quad (2)$$

[0031]

$$\frac{dNH_4}{dt} = - \sum_i \left[\varphi_{NH_4} \times growthmax_i \times flight_i \times ftemperature_i \times N / C_i \times Chla_i \right. \\ \left. - \alpha_{NH_4_i} \times resmp_i \times e^{kt(Tx - Tempref)} \times N / C_i \times Chla_i \right] \\ + \sum_j \alpha_{NH_4_{zoop_j}} \times resmz_j \times e^{kt(Tx - Tempref)} \times N / C_j \times ZOOP_j + KNmine \times ON \\ - Nitrification + NH_4 loading \quad (3)$$

[0032]

$$\frac{dNO_3}{dt} = - \sum_i \varphi_{NO_{3,i}} \times growthmax_i \times flight_i \times ftemperature_i \times N / C_i \times Chla_i + Nitrification \\ - Denitrification + NO_{3, Loading} \quad (4)$$

[0033]

$$\frac{dDO}{dt} = \sum_i growth_i \times DO / C \times Chla_i - \sum_i resmp_i \times e^{kt(Tx - Tempref)} \times DO / C \times Chla_i \\ - \sum_j resmz_j \times e^{kt(Tx - Tempref)} \times DO / C \times ZOOP_j - KNmine \times DO / N \times ON \\ - KPmine \times DO / P \times OP - Nitrification \times DO / NH_4 + \frac{K_{r,DO} \times Area}{Volume} \times (DO_{sat} - DO) \\ + DO_{loading} \quad (5)$$

[0034] 完整模型公式见说明书附录1。

[0035] (2) 所述的对景观湖水质进行贝叶斯预测需要通过使用贝叶斯统计方法使用马尔科夫链-蒙特卡洛斯 (MCMC) 算法实现。马尔科夫链-蒙特卡洛斯 (MCMC) 公式为:

[0036]

$$p(y | f(\theta, x, y_0)) = \prod_{j=1}^m (2\pi)^{-n/2} |\Sigma \delta_j|^{-1/2} \exp \left[- \frac{y_j - f_j(\theta, x, y_0)}{2} \right]^T \Sigma_{\delta_j}^{-1} (y_j - f_j(\theta, x, y_0)) \quad (6)$$

[0037]

$$p(\theta, y_0, \sigma^2 | y) = \frac{p(y | f(\theta, x, y_0, \sigma^2)) p(\theta) p(y_0) p(\sigma^2)}{\iiint p(y | f(\theta, x, y_0, \sigma^2)) p(\theta) p(y_0) p(\sigma^2) d\theta dy_0 d\sigma^2} \quad (7)$$

[0038] 式中m为变量数,n是实测值数量。 $\Sigma \delta_j$ 为模型误差, y_j 和 $f_j(\theta, x, y_0)$ 分别为模型计算值和模型模拟值; $p(\theta)$ 是前验参数密度分布, $p(\sigma^2)$ 基于基于前验密度的反伽马分布。将

(6) 和 (7) 联立, 获得方程 (8)。

[0039]

$$\begin{aligned}
 p(\theta, y_0, \sigma^2 | y) &\propto p(y | f(\theta, x, y_0, \sigma^2)) p(\theta) p(y_0) p(\sigma^2) \\
 &\propto \prod_{j=1}^m (2\pi)^{-n/2} |\sum \delta_j|^{-1/2} \exp \left[-\frac{(y_j - f_j(\theta, x, y_0))^T \sum_{\delta_j}^{-1} (y_j - f_j(\theta, x, y_0))}{2} \right] \\
 &\quad \times (2\pi)^{-l/2} |\Sigma_\theta|^{-1/2} \prod_{k=1}^l \frac{1}{\theta_k} \exp \left[-\frac{[\log \theta - \theta_0]^T \sum_\theta^{-1} [\log \theta - \theta_0]}{2} \right] \\
 &\quad \times (2\pi)^{-m/2} |\Sigma_{y_0}|^{-1/2} \exp \left[-\frac{[y_0 - y_{0m}]^T \sum_{y_0}^{-1} [y_0 - y_{0m}]}{2} \right] \\
 &\quad \times \prod_{j=1}^m \frac{\beta_j^{\alpha_j}}{\Gamma(\alpha_j)} \sigma_j^{-2(\alpha_j+1)} \exp \left(-\frac{\beta_j}{\sigma_j^2} \right)
 \end{aligned} \tag{8}$$

[0040] (3) 使用水质模型方程和贝叶斯统计方法对模型进行拟合, 结合方程 (8), 将入水氨氮、硝态氮、磷酸盐、溶解氧浓度和景观湖水氨氮、硝态氮、磷酸盐、叶绿素、溶解氧浓度输入到模型。读取服务器数据库中存储的相应监测数据, 并将监测数据输入水质模型, 对景观湖水体富营养风险进行预测; 对于进水水质有周期性波动的景观湖, 在建模时, 选取的样本监测数据要具备周期性变化的特征, 即选取一个完整水质变化周期内的样本监测数据进行建模, 以保证模型模拟结果的稳定可靠。在实际使用中, 本发明中所构建的富营养化风险预测模型可以每年更新一次建模数据 (即每年重新建模一次), 而如果景观湖泊的年际水质相对稳定, 模型更新周期可以设定得更长。最后通过模型计算, 得到后验参数分布, 获取模型求解结果 (平均值和上下 95% 置信线), 以及检查模型模拟准确度。

[0041] 3. 根据不同入水情况下浓度的分布情况, 来判断景观湖水水质风险预警;

[0042] (1) 所述的根据不同入水浓度分布下监测到的进水总氮、总磷、氨氮、硝态氮、磷酸盐、溶解氧浓度来判断对景观湖泊富营养风险概率。将入水浓度情况, 带入 1 中所求解的模型, 预测未来一段时间内水质变化情况, 获取模拟均值和上下 95% 置信值。

[0043] (2) 以获得模拟数据为基础, 由《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) 可知, 为了满足景观水体的观赏功能和生态服务功能, 要求景观水水质至少能够满足 V 类水质的标准。所以, 以 GB3838-2002 水质指标限值为依据, 将估计的整个预测值在标准内各类水质分布的概率作为预警强度划分的依据, 通过使用指标限值的量 Δ 作为预警强度划分的依据。若区间估计的上限值大于相应的指标限值, 而区间估计的下限值小于指标限值, 则:

$$[0044] \quad \Delta = \left(\alpha + \frac{l_1 - 1}{l_1 - l_2} \right) \times 100\%$$

[0045] 其中, l_1 和 l_2 分别为标准内各类水质上下限值, l 为模型预测出来相应水质指标浓度; α 为参数: 当预测值为 I 类水体数值为 0, II 类水体数值为 20, III 类水体数值为 40, IV 类水体数值为 60, V 类水体数值为 80。

[0046] 若区间估计的下限值大于 V 类水质指标限值, 则: $\Delta = 100\%$;

[0047] 所以, 预警依据和预警强度的对照表如下表 1:

[0048] 表 1 景观水体水质预警依据与预警强度对照表

[0049]

预警依据	$\Delta=0$	$0<\Delta\leq40\%$	$40\%<\Delta\leq80\%$	$80\%<\Delta\leq100\%$
预警强度	无警	轻警	中警	重警

[0050] (3) 将95%上下置信值和均值分别作预警强度计算,可以获得一个预警强度范围。针对不同的预警强度范围,水质管理决策者就应该采取相应的处理措施。例如,对于预警强度范围为无警,这说明景观水的水质能够满足I类水体的标准;对于强度范围为轻警,可以对景观水进行日常的监测,但需要引起注意;对于强度范围为中警,就需要对景观水体加强监测,并引起较大的注意;对于范围内有重警,有很大可能景观水体已经无法满足水质标准,需要进行更为严格和迅速的水质治理。

[0051] 尽管上面结合附图对本发明进行了描述,但是本发明并不局限于上述的具体实施方式,上述的具体实施方式仅仅是示意性的,并不是限制性的,本领域的普通技术人员在本发明的启示下,在不脱离本发明宗旨和权利要求所保护的范围情况下,还可以做出很多形式,这些均属于本发明的保护范围之内。

[0052] 附录1

[0053] 表2模型数学公式表达

[0054]

标号	子模型名称	符号	公式
1	浮游植物	$\frac{dPHYT_i}{dt}$	$= growth_i \times PHYT_i$ $- filter_i \times e^{kt_{filt} \cdot (Tx - Tempref)} \times PHYT_i$ $- (V_{settle_i} \times PHYT_i) / z$ $- resmp_i \times e^{kt \cdot (Tx - Tempref)} \times PHYT_i$ $- \sum Grazing_i \times ftemperature_j \times ZOOP_j$
			其中:
			$growth_i$ 浮游植物生长速率
			$f_{nutrient_i}$ 营养盐限制性因子
			ϕNA_i 氮限制性因子
			ϕNO_3 硝酸盐限制性因子
			$\phi NH_{4,i}$ 氨氮限制性因子
			$\phi PO_{4,i}$ 磷酸盐限制性因子
			f_{light_i} 光照限制性因子
			$resmp_i$ 基本代谢速率
			$f_{temperature_i}$ 温度限制因子
2	磷酸盐浓度	$\frac{dPO_4}{dt}$	$= - \sum_i \left(\begin{array}{l} \phi PO_{4i} \times growth_{max_i} \times f_{light_i} ? \\ \times f_{temperature_i} \times P / C_{PHYT_i} \times PHYT_i \\ - \alpha_{PO_{4i}} \times resmp_i \times e^{kt(Tx - Tempref)} \\ \times P / C_{PHYT_i} \times PHYT_i \end{array} \right)$ $+ \sum_j \alpha_{PO_{4j}} \times resmz_j \times e^{kt(Tx - Tempref)}$ $+ \sum_j P / C_{zoop_j} \times ZOOP_j$ $+ KP_{mine} \times OP + PO_{4,loading}$
			其中:
			KP_{mine} 有机磷矿化速率
3	氨氮浓度	$\frac{dNH_4}{dt}$	$= - \sum_i \left(\begin{array}{l} \phi NH_{4,i} \times growth_{max_i} \times f_{light_i} \times \\ f_{temperature_i} \times N / C_i \times PHYT_i \\ - \alpha_{NH_{4,i}} \times resmp_i \times e^{kt(Tx - Tempref)} \\ \times N / C_i \times PHYT_i \end{array} \right)$ $+ \sum_j \alpha_{NH_{4,zoop,j}} \times resmz_j \times e^{kt(Tx - Tempref)}$ $+ \sum_j N / C_j \times ZOOP_j$ $+ KN_{mine} \times ON-Nitrification + NH_{4,loading}$
			其中:
			KN_{mine} 有机氮矿化速率
			$Nitrification$ 硝化作用速率
			$f_{temp_{nitr}}$ 温度限值因子

[0055]

标号	子模型名称	符号	公式
4	硝酸盐浓度	$\frac{dNO_3}{dt}$	$= -\sum_i \phi NO_{3,i} \times growth_{max_i} \times flight_i$ $- \sum_i \times ftemperature_i \times N/C_i \times PHYT_i$ $+ Nitrification - Denitrification + NO_{3,Loading}$
	其中:	$Denitrification$ $ftemp_{denitr}$	反硝化速率 温度限制因子
5	溶解氧	$\frac{dDO}{dt}$	$= \sum_i growth_i \times DO / PHYT_i \times PHYT_i$ $- \sum_i resmp_i \times e^{kt(Tx-Tempref)} \times DO / PHYT_i \times PHYT_i$ $- \sum_j resmz_j \times e^{kt(Tx-Tempref)} \times DO / ZOOP_j \times ZOOP_j$ $- KNmine \times DO / ON \times ON$ $- KPmine \times DO / OP \times OP$ $- Nitrification \times DO / NH_4$ $+ \frac{K_{r,DO} \times Area}{Volume} \times (DO_{sat} - DO)$ $+ DO_{loading}$
	其中:	DO_{sat}	饱和溶解氧浓度

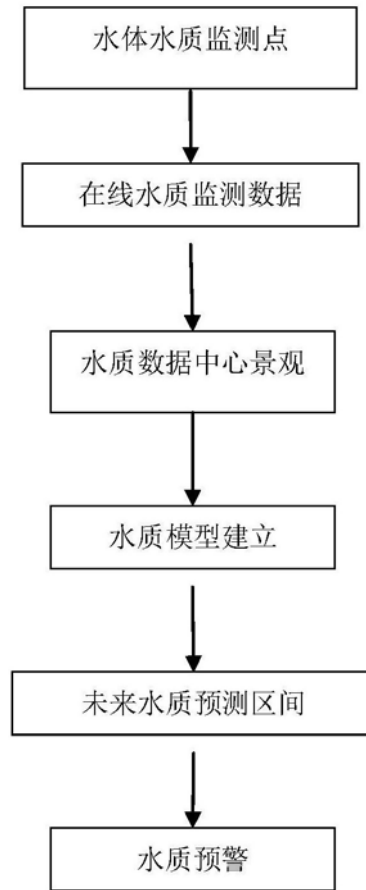


图1

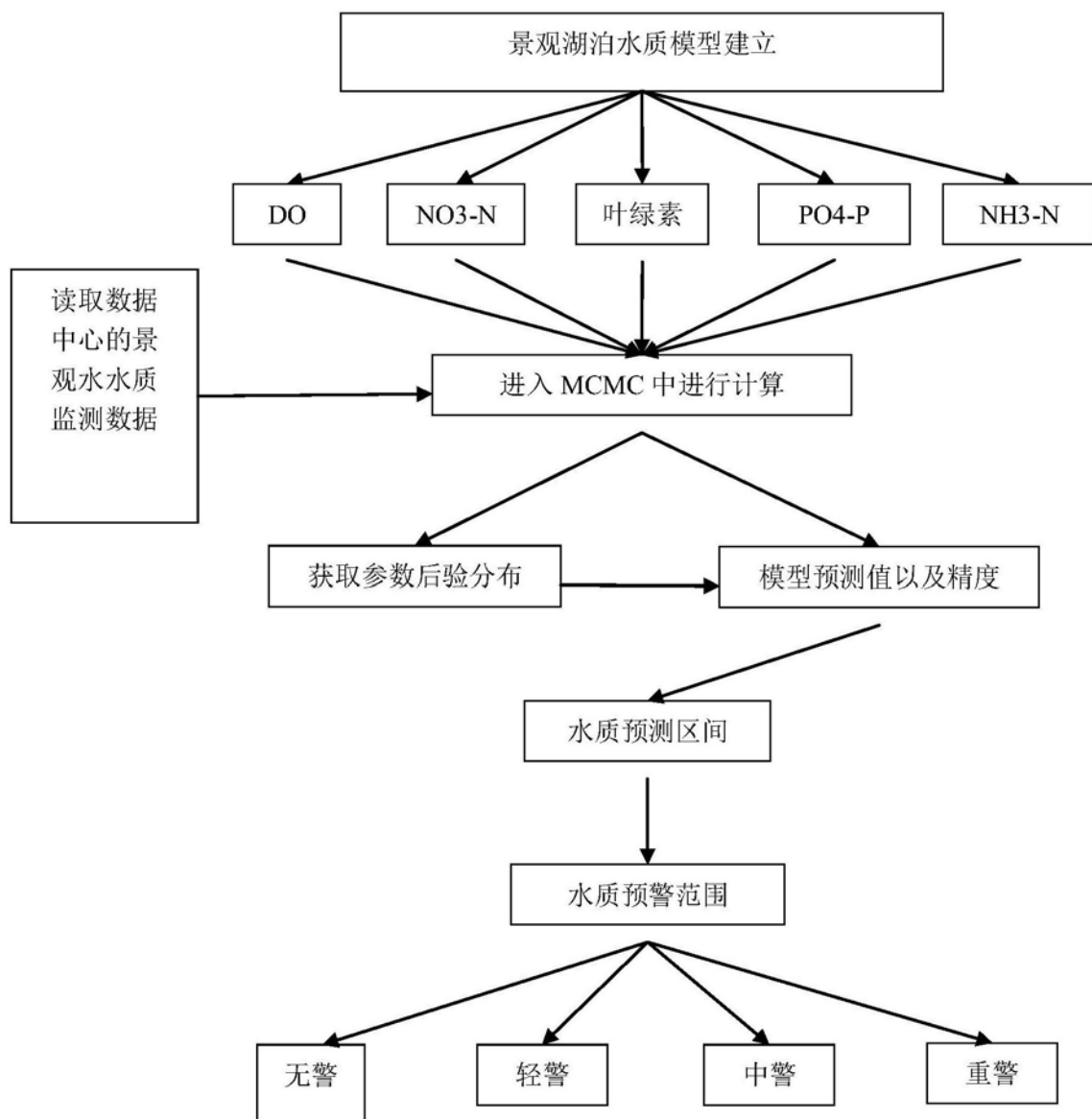


图2