

ICS
CCS

团 体 标 准

T/ACEF 000-202X

湖库水环境数值模型构建技术规范

Technical standard for establishing mathematical water environment models
of lake and reservoir

(征求意见稿)

2000-00-00发布

2000-00-00实施

中华环保联合会 发布

目 次

前 言	I
1 适用范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 湖库水质数学模拟的基本流程.....	2
5 模型的基础资料要求.....	3
6 湖库水体水动力学、水质状况初步分析.....	4
7 湖库水环境数值模型构建.....	5
8 模型参数的确定、率定与验证.....	6
9 湖库水质数学模拟及结果合理性分析.....	7
附 录 A 常用数学模型基本方程及解法.....	9
附 录 B 常见污染物转化过程的一般描述.....	15
附 录 C 湖泊（水库）营养状态评价.....	18

前 言

本文件按照GB/T1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件为首次发布。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国水利水电科学研究院提出。

本文件由中华环保联合会归口。

本文件起草单位：中国水利水电科学研究院、

本文件主要起草人：

1 适用范围

本文件规定了湖泊、水库进行以水质评估、分析、预测为目的数值模型选择、资料收集、构建、率定验证、模拟计算及结果合理性分析等工作方面的技术要求。

本文件适用于大型水库（含大型水电工程、大型水利枢纽工程）、深水型湖泊的水质演化过程数值模拟相关工作。

本文件适用于湖泊、水库水质的常规数值分析、水质突发事件应急分析及水质专项研究分析。

中小型水库、浅水湖泊可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 3838	地表水环境质量标准
GB/T 25173	水域纳污能力计算规程
SL/T 278	水利水电工程水文计算规范
NB/T 10233	水电工程水文设计规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

湖库水质 water quality of reservoirs and lakes

湖泊、水库水体在环境作用下表现出来的综合特征，即水体的物理性质和化学成分。

3.2

水质数值模型 mathematical model of water quality

描述水体中水质变化规律的数学表达式，以物质守恒原理为基础，反映污染物排放与水体质量的定量关系，主要用于水体污染特性、水体纳污容量的研究和水质预测。

3.3

缺氧区 anoxic zone

水体中的溶解氧（DO）浓度小于2.0mg/L的区域。

4 湖库水质数学模拟的基本流程

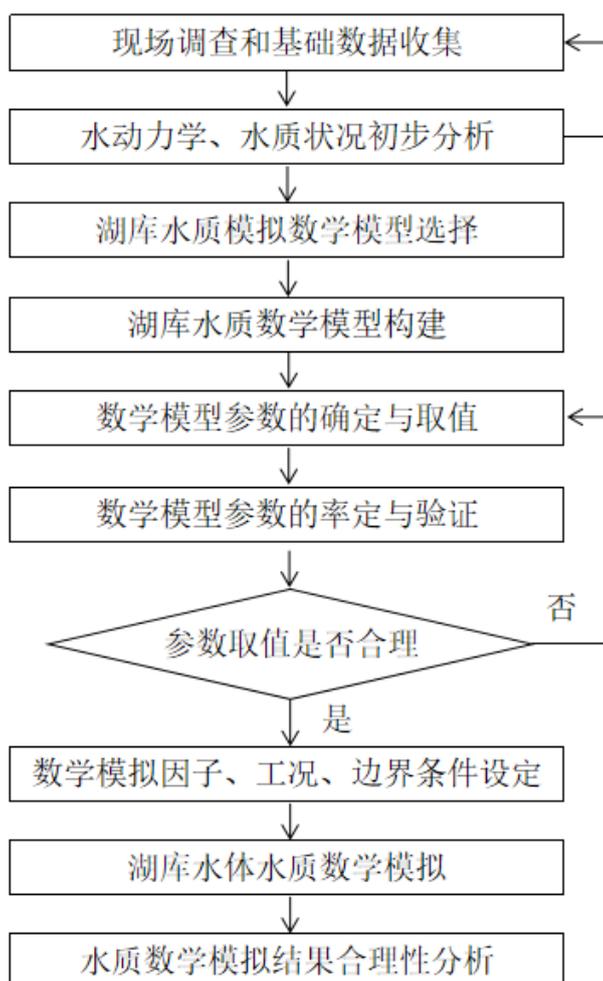


图 1 湖库水质数学模拟基本流程图

4.1 现场调查和基础数据收集

针对需要开展数学模拟的湖库对象，开展必要的现场调查。根据数值模拟工作需要，开展详细的基础数据收集。

4.2 模拟对象水动力学、水质状况初步分析

针对需要开展数学模拟的湖库对象，开展水动力学、水质特征初步分析，结合模拟工作的目的和需求，初步判断能体现模拟对象水动力学、水质特征的关键时段、过程和区域等。

4.3 湖库水质模拟数值模型选择

针对需要开展模拟的湖库对象及模拟工作目的，选择适当的水环境数值模型。

4.4 数值模型的构建

根据模拟对象湖库的基本特征、模拟工作的技术要求，开展模拟区域的概化，确定模拟工作的初始条件、边界条件、模拟工况、模拟精度等。

4.5 湖库水环境数值模型参数的确定、率定与验证

确定模型所需的主要参数取值，选取区域实测水文、水质数据，对构建的数值模型开展率定和验证工作，修正模型主要参数取值。

4.6 湖库水体水质数学模拟

在率定验证后的模型基础上，针对数学模拟的工作目的及设定模拟因子、边界条件，确定模拟工况，对湖库水体水质开展数学模拟。

4.7 湖库水体水质数学模拟结果合理性分析

对模型模拟的水质结果展开合理性分析，确定结果的可用性和准确性。

5 模型的基础资料要求

5.1 基本要求

开展湖库水质数学模拟前，应以湖库所在流域区域为重点，收集湖库所在流域区域的基础资料，主要包括但不限于下列内容：湖库基本情况、自然地理、气象水文、湖库水下地形、湖库水质状况、湖库水质管理要求、污染源基本情况等。

5.2 基础资料要求

5.2.1 湖库基本情况资料主要包括湖泊地理位置、水库建设地点、湖库规模、水库开发方式、湖库水文基本情况、水位变动特征、水库运行调度方案等。

5.2.2 自然地理资料主要包括地形地貌图、水系图，河流特征，流域面积，土地利用，水资源分区、水文地质资料等。

5.2.3 气象水文资料主要包括湖库周边的气象与水文站名录和分布图及相应站点的气象水文资料，包括降水量、蒸发量，实测和天然径流系列、河流水沙参数等。

5.2.4 湖库形态资料主要包括湖（库）盆形态，湖库流态，湖泊水下地形基本特征，水下地形或断面地形数据等。

5.2.5 水环境基础资料主要包括湖库所在区域的国控、省控水质断面分布情况、水质状况、达标情况、水功能区划及水质目标、排污口位置、排放特点、污水排放量、排放浓度、主要污染物等。

5.2.6 水资源开发利用资料主要包括湖库既有取水口、引水口、饮用水水源保护区基本情况、湖库水资源开发利用情况、取用水户分布及开发利用情况，取用水过程等。

5.2.7 一致性及可靠性分析。对收集的基础数据资料进行数据一致性分析。应明确模型采用基础数据的来源，保证基础数据的可靠性。

6 湖库水体水动力学、水质状况初步分析

6.1 湖库水体水动力学状况分析

6.1.1 应根据模拟湖库的水系、位置、面积、容积、几何形态、主要功能、人为运行调度方式、所在区域气象特征等，初步分析湖库水动力学总体特征。

6.1.2 展开分析的湖库水动力学总体特征可包括湖库水体的水量平衡状况和水动力学主要特点。

6.1.3 湖库水体的水量平衡状况包括水体的总容积、年内容积变化情况、水量补给来源、补给方式和补给量，水量泄放去向、泄放方式和泄放量、水体蒸发渗漏量、水体置换率等。

6.1.4 湖库水体的水动力学主要特点包括水体水面宽度、特征水位、年内水位和水面宽度变化情况、水体总体流场分布特征、流动特征等。

6.1.5 开展湖库水体水动力学状况分析时应特别关注可能引起水体水动力学显著变化的关键区域，如水体汇合口、泄水口、地形显著变化处等。

6.2 湖库水质状况初步分析

6.2.1 应根据模拟湖库的来水水质状况、模拟水体水质状况、水功能区达标情况、水体主要污染因子、水体汇水区污染特征、水体内源污染状况等，初步评估水体水质状况。

6.2.2 应根据模拟湖库水体水动力学状况分析成果，结合模拟湖库水体污染特征、气象条件（气温、风速、相对湿度等）等分析水体热分层状况、氧分层状况、污染物释放特征，判断水体的水质影响敏感区，初步确定水质数值模拟应重点关注的区域。

6.2.3 对于湖泊、水库水体分层情形，即湖库水质代表性指标（如水温、溶解氧或其他水质指标）随水体深度而变化，呈层状分布的现象。可根据湖库水体自表层至底层的表层、跃层

和底层三个主要部分，在进行湖库水质状况初步分析时，应重点关注水体分层的年内分布时间、水体垂向分层结构特征、不同水层的位置、厚度、水质因子指标的变化梯度等。

6.2.4 对于水体缺氧状态导致磷、铁、锰等元素加速释放情况下，若水体内氨氮浓度明显上升变化，在进行湖库水质状况初步分析时，应重点关注水体缺氧区的出现时间、位置、面积、厚度等。

6.2.5 应将影响水体水质状况的缺氧区作为湖库水质模拟的关键区域。

6.2.6 在进行湖库水质状况初步分析时，可辅以现场监测的方式确定水体水质垂向层化状态、缺氧区特征、水体主要污染状况等。

7 湖库水环境数值模型构建

7.1 模型的选择

7.1.1 湖库水环境模型应优先采用数值解模型，在模拟湖库水域形态规则、水流均匀且排污稳定时可以采用解析解模型。

7.1.2 应根据模拟工作的目的、精度要求等选择合适的模型种类。

7.1.3 当湖库水体水流交换作用较充分、污染物质分布基本均匀时可选用零维模型。

7.1.4 污染物在断面上均匀混合的河道型水库宜选用纵向一维模型。

7.1.5 垂向分层不明显的浅水湖库宜选用平面二维模型。

7.1.6 存在垂向分层，水平（横向、纵向）分布差异不明显的深水湖库，宜选用垂向一维模型。

7.1.7 横向分布差异不明显，存在垂向分层及纵向差异的深水型湖库宜选用立面二维模型。

7.1.8 垂向及水平分布差异明显的深水型湖库宜选用三维模型。

7.2 模型初始条件的设定

7.2.1 初始条件（水文、水质、水温等）设定应满足所选用模型的基本要求，需合理确定初始条件，控制预测结果不受初始条件的影响。

7.2.2 当初始条件对计算结果的影响在短时间内无法有效消除时，应延长模拟计算的初始时间，必要时开展初始条件敏感性分析。

7.3 模型模拟因子的选择

7.3.1 应根据湖库现状情况下的水文基本特征或数学模拟工作的具体需求，确定模型的水文

模拟因子，可包括湖库水位（水深）、流速、流量与径流过程等。

7.3.2 可结合湖库所在水环境控制单元或区域水环境质量现状，确定模型的水质模拟因子，可包括水体常规水质因子、特征污染因子，也可根据数学模拟的具体要求选择因子。

7.3.3 当湖库水体可能出现水体富营养化时，模拟因子还应包括与富营养化有关的因子（如总磷、总氮、叶绿素 a、高锰酸盐指数和透明度等）。

7.4 模型边界条件及工况的设定

7.4.1 模型水文边界条件：可根据湖库水质数学模拟的需求设定相应的水文边界条件，水文边界条件主要包括入湖（库）支流水量过程、降雨径流过程、湖（库）蓄水量变化过程、湖（库）水位过程、湖（库）出水流量过程、湖库与地下水的水量交换过程等。为保证计算结果安全，可采用湖库近 10 年最低月平均水位或 90%保证率最枯月平均水位相应的蓄水量或水库死库容相应的蓄水量作为不利枯水条件。

7.4.2 模型水质边界条件：可根据湖库水质数学模拟的需求设定相应的水质边界条件，水质边界条件主要包括入湖库支流水质过程、湖库周边排污口排污过程、面源污染过程、湖库水质变化过程、湖库内源污染释放过程，大气污染沉降过程，湖库与地下水的水质交换过程等。水质边界条件应覆盖模拟范围内的所有与湖库水体水环境相关的污染源。当开展水质突发事件应急分析时，还应包括水质突发事件排污边界条件。

7.4.3 模型气象边界条件：可根据模拟范围内或附近的常规气象监测站点数据进行合理确定。气象边界条件可采用多年平均气象资料或典型年实测气象资料数据。气象边界条件数据应包括气温、相对湿度、日照时数、降雨量、云量、风向、风速等。

7.4.4 可根据湖库水质数学模拟的需求合理确定模拟计算工况。当应用模型进行湖库水质预测预报时，应根据需求合理设定模型相关边界条件。

8 模型参数的确定、率定与验证

8.1 基本要求

8.1.1 应在应用模型开展模拟工作前，确定模型主要参数取值。

8.1.2 为保证湖库水质数学模拟结果的准确性，在应用数值模型前应根据实测水文、水质数据对模型关键水动力学、水质参数开展率定与验证。经过率定验证的数值模型方可开展相关数值模拟工作。

8.1.3 水动力及水质模型参数包括水文及水力学参数、水质（包括水温及富营养化）参数等。

其中水文及水力学参数包括糙率等；水质参数包括污染物综合衰减系数、扩散系数、耗氧系数、复氧系数、蒸发散热系数等。

8.2 参数的确定与率定、验证

8.2.1 模型参数确定和取值可采用类比、经验公式、实验室测定、物理模型试验、现场实测及模型率定验证等，可以采用多类方法比对确定模型参数。当采用数值解模型时，宜采用模型参数率定、验证法核定模型参数取值。

8.2.2 模型参数率定、验证法分为参数率定和参数验证两部分。

8.2.3 在进行参数率定时，应通过模型计算结果与实测数据进行比较，调整和确定模型主要参数取值。

8.2.4 模型参数率定后，应采用与模型参数率定不同组实测数据对已确定参数的适用性和可靠性进行验证。

8.2.5 模型参数率定、验证采用的实测数据应选用模型模拟计算范围内的实测数据，数据类型、精度可根据模型模拟工作的需求确定。

8.2.6 应在湖库模拟计算范围内选取多点开展模型参数的率定、验证工作，选取的点位数量可根据模拟范围进行动态调整，一般不少于 3 个。

8.2.7 可应用水面面积、水深、流速、流量及主要水质预测因子的模拟结果作为参数率定、验证的依据。当采用二维或三维模型时，可辅以开展流场分析。

8.2.8 模型率定、验证应分析模拟结果与实测结果的拟合情况，阐明模型参数取值的合理性，可采用模拟结果与实测结果间的相对误差，均方根误差等参数对模拟结果拟合程度进行判断。

9 湖库水质数学模拟及结果合理性分析

9.1 湖库水质数学模拟

9.1.1 湖库水质数学模拟内容一般包括水动力学状况模拟和水质状况模拟。

9.1.2 湖库水动力学状况模拟结果一般主要包括湖库水体平面及垂向流场时空变化过程、湖库水体水位时空变化过程、湖库水体关键区域水体水动力学时空变化过程、湖库泄水过程对水体水动力状况的影响过程、洪水对湖库水体水动力状况的影响过程等。

9.1.3 在湖库水动力学状况模拟时应考虑降水、蒸发、风场等气象要素非均匀性特征对模拟区域水动力学状况的影响。可采用模拟区域范围内多个气象站的监测数据对模型边界条件进行校核。

9.1.4 湖库水质状况模拟结果一般主要包括湖库水体垂向水温结构及热分层过程、湖库水体垂向溶解氧结构及氧分层过程、湖库水体溶解氧状况及年内水体缺氧状况，湖库水体水质状况及水功能区达标情况、湖库水体关键区域水质时空变化过程、湖库水体富营养化状态变化过程等。

9.1.5 可将湖库水体的常规监测点、水功能区控制断面、水环境保护目标、水质水量突变处等作为水质模拟的重点区域。

9.1.6 可应用湖库水环境数值模型对湖库水体水环境状况开展预测与未来变化趋势分析。

9.2 湖库水质数学模拟结果合理性分析

9.2.1 数学模拟计算成果的内容、精度和深度应满足相应工作的技术要求。

9.2.2 应根据模拟对象区域环境基本特征、模拟工况、模拟工作目标等对模型的模拟结果开展合理性分析。

9.2.3 采用模型进行水体水动力学分析时，可对模型计算的关键影响区域和重要影响时段的流场、流态、关键断面流速分布等模拟结果进行分析。

9.2.4 采用模型进行水体水质分析时，在必要的情况下可对模拟结果开展质量或热量守恒分析。

9.2.5 可采用不同模型的计算结果进行比对分析。

附录 A

(资料性)

常用数学模型基本方程及解法

A.1 零维数学模型

A.1.1 均匀混合模型

基本方程为:

$$V \frac{dC}{dt} = W - QC + f(C)V \quad (\text{A.1})$$

式中: V —水体体积, m^3 ; C —污染物浓度, mg/L ; W —单位时间污染物排放量, g/s ;
 Q —水量平衡时流入与流出湖(库)的流量, m^3/s ; $f(C)$ —生化反应项, $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

如果生化过程可以用一级动力学反应表示, $f(C) = -kC$, 上式存在解析解, 当稳定时:

$$C = \frac{W}{Q + kV} \quad (\text{A.2})$$

式中: k ——污染物综合衰减系数, $1/\text{s}$;

其他符号说明同式 (E.1)。

A.1.2 狄龙模型

描述营养物平衡的狄龙模型:

$$[P] = \frac{I_p(1 - R_p)}{rV} = \frac{L_p(1 - R_p)}{rh} \quad (\text{A.3})$$

$$R_p = 1 - \frac{\sum q_a [P]_a}{\sum q_i [P]_i} \quad (\text{A.4})$$

$$r = Q/V \quad (\text{A.5})$$

式中: $[P]$ —湖(库)中氮、磷的平均浓度, mg/L ; I_p —单位时间进入湖(库)的氮(磷)

质量, g/a; L_p —单位时间、单位面积进入湖(库)的氮、磷负荷量, g/(m²·a); V —湖(库)容积, m³; h —平均水深, m; Q —湖(库)年出流量, m³/a; R_p —氮、磷在湖(库)中的滞留率; q_a —年出流的水量, m³/a; q_i —年入流的水量, m³/a; $[P]_a$ —年出流的氮(磷)平均浓度, mg/L; $[P]_i$ —年入流的氮(磷)平均浓度, mg/L。

A.2 垂向一维数学模型

适用于模拟预测水温在面积较小、水深较大的水库或湖泊水体中,除太阳辐射外没有其他热源交换的状况。

水量平衡的基本方程为:

$$\frac{\partial(wA)}{\partial z} = (u_i - u_o)B \quad (\text{A.6})$$

水温数学模型的基本方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} (wAT) = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} (AD_z \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{B}{A} (u_i T_i - u_o T_o) - \frac{1}{\rho C_p A} \frac{\partial(\varphi A)}{\partial z} \quad (\text{A.7})$$

式中: T —水温, °C; w —垂向流速, m/s; A —垂向水面面积, m²; D_z —水温垂向紊动扩散系数, m²/s; u_i —入流流速, m/s; u_o —出流流速, m/s; T_i —入流水温, °C; T_o —出流水温, °C; B —水面宽度, m; ρ —水的密度, kg/m³; C_p —水的比热, J/(kg·°C); φ —太阳热辐射通量, J/(m²·s); z —笛卡尔坐标系 X 向的坐标, m; t —时间, s。

A.3 平面二维数学模型

适用于模拟预测物质在宽浅水体(大河、湖库、入海河口及近岸海域)中,在垂向均匀混合的状况。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (\text{A.8})$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -g \frac{\partial(h+z_b)}{\partial x} + fv - \frac{g}{C_z^2} \cdot \frac{\sqrt{u^2+v^2}}{h} u + \frac{\tau_{sx}}{\rho h} + A_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -g \frac{\partial(h+z_b)}{\partial y} - fu - \frac{g}{C_z^2} \cdot \frac{\sqrt{u^2+v^2}}{h} v + \frac{\tau_{sy}}{\rho h} + A_m \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)\end{aligned}\quad (\text{A.9})$$

式中： h ——水深，m； u ——对应于 x 轴的平均流速分量，m/s； v ——对应于 y 轴的平均流速分量，m/s； z_b ——河底高程，m； f ——科氏系数， $f = 2\Omega \sin \varphi$ ，1/s； g ——重力加速度， m/s^2 ； C_z ——谢才系数， $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ ； τ_{sx} 、 τ_{sy} ——分别为水面上的风应力， $\tau_{sx} = r^2 \rho_a w^2 \sin \alpha$ ， $\tau_{sy} = r^2 \rho_a w^2 \cos \alpha$ ， r^2 为风应力系数， ρ_a 为空气密度， kg/m^3 ， w 为风速，m/s， α 为风方向角； ρ ——水的密度， kg/m^3 ； A_m ——水平涡动粘滞系数， m^2/s ； x ——笛卡尔坐标系 X 向的坐标，m； y ——笛卡尔坐标系 Y 向的坐标，m； t ——时间，s。

水温数学模型的基本方程为：

$$\frac{\partial(hT)}{\partial t} + \frac{\partial(uhT)}{\partial x} + \frac{\partial(vhT)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{tx} h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ty} h \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S_T \quad (\text{A.10})$$

式中： T ——水温， $^{\circ}\text{C}$ ； D_{tx} ——水温纵向紊动扩散系数， m^2/s ； D_{ty} ——水温横向紊动扩散系数， m^2/s ； S_T ——温度源项， $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ；水质数学模型的基本方程为：

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(uhC)}{\partial x} + \frac{\partial(vhC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + hf(C) + S \quad (\text{A.11})$$

式中： C ——污染物浓度， mg/L ； D_x ——污染物纵向紊动扩散系数， m^2/s ； D_y ——污染物横向紊动扩散系数， m^2/s ； S ——源（汇）项强度， $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ； $f(C)$ ——污染物生化反应项， $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ；

A.4 立面二维数学模型

水动力数学模型的基本方程为：

$$\frac{\partial(Bu)}{\partial x} + \frac{\partial(Bw)}{\partial z} = 0 \quad (\text{A.32})$$

$$\frac{\partial(Bu)}{\partial t} + \frac{\partial(Bu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(Bwu)}{\partial z} + \frac{B}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (BA_h \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (BA_z \frac{\partial u}{\partial z}) - \frac{\tau_{wx}}{\rho} \quad (\text{A.13})$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g = 0 \quad (\text{A.14})$$

式中： B —宽度，m； u —纵向流速，m/s； w —垂向流速，m/s； P —压力，Pa； ρ —水体密度，kg/m³； A_h —水平方向的涡粘性系数，m²/s； A_z —垂直方向的涡粘性系数，m²/s； τ_{wx} —边壁阻力，N； g —重力加速度，m/s²； x —笛卡尔坐标系 X 向的坐标，m； y —笛卡尔坐标系 Y 向的坐标，m； t —时间，s。

水温数学模型的基本方程为：

$$\frac{\partial(BT)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (BuT) + \frac{\partial}{\partial z} (BwT) = \frac{\partial}{\partial x} (BD_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (BD_z \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial(B\phi)}{\partial z} \quad (\text{A.15})$$

式中： T —水温，℃； D_x —横向的水温紊动扩散系数，m²/s； D_z —垂向的水温紊动扩散系数，m²/s； ϕ —太阳热辐射通量，J/(m²·s)； C_p —水的比热，J/(kg·℃)；

水质数学模型的基本方程为：

$$\frac{\partial(BC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (BuC) + \frac{\partial}{\partial z} (BwC) = \frac{\partial}{\partial x} (BD_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (BD_z \frac{\partial C}{\partial z}) + S + Bf(C) \quad (\text{A.16})$$

式中： C —污染物浓度，mg/L； D_x —横向污染物紊动扩散系数，m²/s； D_z —垂向污染物紊动扩散系数，m²/s； S —源(汇)项，g/(m²·s)； $f(C)$ —污染物反应项，g/(m³·s)；

A.5 三维数学模型

水动力数学模型的基本方程为：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{A.47})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (A_h \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_h \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \frac{\partial u}{\partial z}) + 2\theta v \sin \varphi \quad (\text{A.18})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (A_h \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_h \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \frac{\partial v}{\partial z}) - 2\theta u \sin \varphi \quad (\text{A.19})$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g = 0 \quad (\text{A.50})$$

式中： u —纵向流速，m/s； v —横向流速，m/s； w —垂向流速，m/s； P —压力，Pa； ρ —水体密度，kg/m³； A_h —水平方向的涡粘性系数，m²/s； A_z —垂直方向的涡粘性系数，m²/s； θ —地球自转角速度， ω /s； φ —当地纬度； g —重力加速度，m/s²； x —笛卡尔坐标系 X 向的坐标，m； y —笛卡尔坐标系 Y 向的坐标，m； z —笛卡尔坐标系 Z 向的坐标，m； t —时间，s。

水温数学模型的基本方程为：

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (D_{tx} \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_{ty} \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_{tz} \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{\varphi}{\rho C_p} \quad (\text{A.21})$$

式中： T —水温， $^{\circ}\text{C}$ ； D_{tx} — X 方向上的水温紊动扩散系数，m²/s； D_{ty} — Y 方向上的水温紊动扩散系数，m²/s； D_{tz} — Z 方向上的水温紊动扩散系数，m²/s； φ —热交换反应式，J/(m²·s)； ρ —水体密度，kg/m³； C_p —水的比热，J/(kg· $^{\circ}\text{C}$)；

水质数学模型的基本方程为：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(D_z \frac{\partial C}{\partial z}) + S + f(C)$$

(A.22)

式中： C —污染物浓度，mg/L； D_x — X 方向上的污染物紊动扩散系数， m^2/s ； D_y — Y 方向上的污染物紊动扩散系数， m^2/s ； D_z — Z 方向上的污染物紊动扩散系数， m^2/s ； S —源(汇)项， $g/(m^2 \cdot s)$ ； $f(C)$ —污染物生化反应项， $g/(m^3 \cdot s)$ ；

附录 B

(资料性)

常见污染物转化过程的一般描述

本标准列出了常见污染物转化过程的一般性描述方法,可以根据评价水域的实际情况进行选取或者进行一定的调整。对于不同空间维数的数学模型,这些表达式中与某些系数相关的空间变量应有相应的变化。

B.1 持久性污染物

如果污染物在水中难以通过物理、化学及生物作用进行转化,并且污染物在水中是溶解状态,可以作为非降解物质进行处理。

$$f(C) = 0 \quad (\text{B.6})$$

B.2 化学需氧量 (COD)

$$f(C) = -k_{\text{COD}} C \quad (\text{B.2})$$

式中: C —COD 浓度, mg/L; k_{COD} —COD 降解系数, 1/s。

B.3 五日生化需氧量 (BOD₅)

$$f(C) = -k_1 C \quad (\text{B.3})$$

式中: C —BOD₅ 浓度, mg/L; k_1 —耗氧系数, 1/s。

B.4 溶解氧 (DO)

$$f(C) = -k_1 C_b + k_2 (C_s - C) - \frac{S_o}{h} \quad (\text{B.4})$$

式中: C —DO 浓度, mg/L; k_1 —耗氧系数, 1/s; k_2 —复氧系数, 1/s; C_b —BOD 的浓度, mg/L; C_s —饱和溶解氧的浓度, mg/L; S_o —底泥耗氧系数, g/(m²·s); h —水深, m。

B.5 氮循环

水体中的氮包括氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮三种形态,三种形态之间的转换关系可以表示为:

$$f(N_{\text{NH}}) = -b_1 N_{\text{NH}} + \frac{S_{\text{NH}}}{h} \quad (\text{B.5})$$

$$f(N_{\text{NO}_2}) = b_1 N_{\text{NH}} - b_2 N_{\text{NO}_2} \quad (\text{B.6})$$

$$f(N_{\text{NO}_3}) = b_2 N_{\text{NO}_2} \quad (\text{B.7})$$

式中： N_{NH} 、 N_{NO_2} 、 N_{NO_3} —分别为氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮浓度， mg/L； b_1 、 b_2 —分别为氨氮氧化成亚硝酸盐氮、亚硝酸盐氮氧化成硝酸盐氮的反应速率， 1/s； S_{NH} —氨氮的底泥(沉积)释放率， $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ； h —水深， m。

B.6 总氮(TN)

$$f(C) = -k_{\text{TN}} C + \frac{S_{\text{TN}}}{h} \quad (\text{B.8})$$

式中： C —TN 浓度， mg/L； k_{TN} —总氮的综合沉降系数， 1/s； S_{TN} —总氮的底泥释放(沉积)系数， $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ； h —水深， m。

B.7 磷循环

水体中的磷可以分为无机磷和有机磷两种形态，两种形态之间的转换关系可以表示为：

$$f(C_{\text{PS}}) = -G_{\text{p}} C_{\text{PS}} A_{\text{p}} + c_{\text{p}} C_{\text{PD}} + \frac{S_{\text{PS}}}{h} \quad (\text{B.9})$$

$$f(C_{\text{PD}}) = D_{\text{p}} C_{\text{PD}} A_{\text{p}} - c_{\text{p}} C_{\text{PD}} + \frac{S_{\text{PD}}}{h} \quad (\text{B.10})$$

式中： C_{PS} —无机磷浓度， mg/L； C_{PD} —有机磷浓度， mg/L； G_{p} —浮游植物生长速率， 1/s； A_{p} —浮游植物磷含量系数； c_{p} —有机磷氧化成无机磷的反应速率， 1/s； D_{p} —浮游植物死亡速率， 1/s； S_{PS} —无机磷的底泥释放(沉积)系数， $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ； S_{PD} —有机磷的底泥释放(沉积)系数， $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

B.8 总磷(TP)

$$f(C) = -k_{\text{TP}} C + \frac{S_{\text{TP}}}{h} \quad (\text{B.11})$$

式中： C —TP 浓度， mg/L；

k_{TP} —总磷的综合沉降系数， 1/s；

S_{TP} —总磷的底泥释放(沉积)系数， $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ；

h ——水深, m。

B.9 叶绿素 a(Chl-a)

$$f(C) = (G_p - D_p)C \quad (\text{B.12})$$

$$G_p = \mu_{\max} f(T) \cdot f(L) \cdot f(\text{TP}) \cdot f(\text{TN}) \quad (\text{B.13})$$

式中: C —叶绿素 a 浓度, mg/L; G_p —浮游植物生长速率, 1/s; D_p —浮游植物死亡速率, 1/s; μ_{\max} —浮游植物最大生长速率, 1/s; $f(T)$ 、 $f(L)$ 、 $f(\text{TP})$ 、 $f(\text{TN})$ —分别为水温、光照、TP、TN 的影响函数, 可以根据评价水域的实际情况以及基础资料条件选择适合的函数形式。

B.10 重金属

泥沙对水体重金属污染物具有显著的吸附和解吸作用, 因此重金属污染物的模拟需要考虑泥沙冲淤、吸附解吸的影响。一般情况下, 泥沙淤积时, 吸附在泥沙上的重金属由悬浮相转化为底泥相, 对水相浓度影响不大; 泥沙冲刷时, 水体中重金属浓度会发生一定的变化。吸附解吸作用可以采用动力学方程进行描述, 由于吸附作用一般历时较短, 也可以采用吸附热力学方程描述。

目前重金属污染物数学模型还在发展当中, 可以根据工作的实际情况, 查阅相关文献, 选择适宜的模型。

B.11 热排放

$$f(C) = -\frac{k_T C}{\rho C_p} + q T_0 \quad (\text{B.14})$$

式中: C —水体温升, °C; k_T —水面综合散热系数, J/(S·m²·°C); ρ —水的密度, kg/m³; C_p —水的比热, J/(kg·°C); q —温排水的源强, m/s; T_0 —温排水的温升, °C。

附录 C

(资料性)

湖泊(水库)营养状态评价

C.1 富营状态评价指标

主要指标包括：透明度(SD)、叶绿素(Chla)、总磷(TP)、总氮(TN)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})。

C.2 营养状态评价方法

采用营养状态指数法，综合营养状态指数计算公式为：

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m w_j \cdot TLI(j)$$

式中：TLI(Σ)—综合营养状态指数；

W_j—第j种参数的营养状态指数的相关权重。

TLI(j)—代表第j种参数的营养状态指数。

以chla作为基准参数，则第j种参数的归一化的相关权重计算公式为：

$$w_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2}$$

式中：r_{ij}—第j种参数与基准参数chla的相关系数；

m—评价参数的个数。

中国湖泊(水库)的Chla与其他参数之间的相关关系r_{ij}及r_{ij}²值

参数	Chla	TP	TN	SD	COD _{Mn}
r _{ij}	1	0.84	0.82	-0.83	0.83
r _{ij} ²	1	0.7056	0.6724	0.6889	0.6889

C.3 各项目营养状态指数计算

$$TLI(\text{chla}) = 10(2.5 + 1.086 \ln \text{chla})$$

$$TLI(\text{TP}) = 10(9.436 + 1.624 \ln \text{TP})$$

$$TLI(\text{TN}) = 10(5.453 + 1.694 \ln \text{TN})$$

$$TLI(\text{SD}) = 10(5.118 - 1.94 \ln \text{SD})$$

$$TLI(\text{COD}_{Mn}) = 10(0.109 + 2.661 \ln \text{COD}_{Mn})$$

式中：chla 单位为 mg/m³，SD 单位为 m；其他指标单位均为 mg/L。

C.4 营养状态评价分级标准

采用0~100的一系列连续数字对湖泊营养状态进行分级：

$TLI(\Sigma) < 30$	贫营养 (Oligotropher)
$30 \leq TLI(\Sigma) \leq 50$	中营养 (Mesotropher)
$TLI(\Sigma) > 50$	富营养 (Eutropher)
$50 < TLI(\Sigma) \leq 60$	轻度富营养 (light eutropher)
$60 < TLI(\Sigma) \leq 70$	中度富营养 (Middle eutropher)
$TLI(\Sigma) > 70$	重度富营养 (Hyper eutropher)

在同一营养状态下，指数值越高，其营养程度越重。
