

制订湖泊水污染物排放标准的原则和方法探讨(一)

舒金华

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要 本文在湖水自净能力研究的基础上, 根据我国“水污染防治法”和排放水污染物许可证制度的要求, 结合各地湖泊污染的实际情况, 提出了制订湖泊水污染物排放标准的技术原则、工作程序和计算方法。并附有不同类型湖泊排放标准计算实例, 可供各地湖泊管理部门在制订地方水污染物排放标准中参考选用。

关键词 湖泊 水污染物 排放标准

我国是一个多湖泊的国家^[1], 湖泊资源在生活饮用、水产养殖、农田灌溉、观光游览及航运等国民经济领域中均占有十分重要的地位。随着我国湖区工农业生产的发展和人口的增加, 特别是湖面水产养殖的迅速发展, 排入湖泊水域中的污染物质逐年增加, 致使湖泊水质污染程度日趋严重。为了在发展生产的同时, 努力控制和减轻湖泊的污染, 我们于80年代初, 在入湖水污染物自净规律研究的基础上, 提出了制订地方水污染物排放标准技术原则和方法的初步意见, 并编入国家标准(GB3839-83)颁布实施^[2]。对控制湖泊水污染物排放, 防止湖泊水质进一步恶化, 维护生态平衡, 保护人民身体健康等方面, 起到了一定的积极作用。但因原制订标准的方法较为原则, 在可操作性上还存在一些不足之处。特别是与国家1984年颁布的“水污染防治法”和近期实施的排放水污染物许可证制度的配合上还不够紧密。为此, 我们在充分调查研究, 广泛听取基层单位意见的基础上, 对原订排放标准原则及计算方法, 作了进一步的完善与修改, 并结合各地制订排放标准的需要, 列举了不同类型湖泊, 不同污染物排放标准的计算方法, 以期更好地为我国湖泊环境管理服务。

一、技术原则

在制订入湖水污染物排放标准的工作中, 主要应遵循下述原则:

1. 以湖泊水环境容量为基础的总量控制的原则

湖泊水环境容量系指某湖(或功能区)水域, 在其安全设计水量条件下, 要维持规定的水环境目标所能容纳的污染物来量。在湖泊水污染物排放标准的制订工作中, 应坚持以环境容量作为总量控制的基础, 即不管湖区污染源状况如何变化, 都要控制排入湖泊污染物总量不超过规定标准, 以保证湖泊水域中容纳的污染物质逐步得到减少, 水质逐步得到改善。这样, 还可以克服以往浓度标准控制中, 一些单位为达到排放标准而加水稀释排放的混乱现象。

本文于1992年5月12日收到, 1993年3月31日第二次改回。

2. 以饮用水源保护为重点的原则

目前我国水环境的现状是局部有所控制,总体还在恶化,前景令人担忧^[3]。以全国排入地面水的废水量为例,1990年为 $353 \times 10^9 \text{t}$,较1980年增加17.6%,致使我国有些江河、湖泊的污染较为严重,而且还有继续恶化的趋势。要使所有水域的污染都得到有效的控制和改善,还需较长时间的努力。由于饮用水源的污染直接影响到人民身体健康,带来的损失和危害亦大。因而,在湖泊水污染物排放标准制订工作中,应将引起饮用水源污染的污染源作为控制的重点,确保人民生活饮用水源的供水安全。

3. 经济上合理,技术上可行,区域治理总费用最小的原则

我国幅员辽阔,湖泊众多,各湖区经济技术水平差异较大,承受削减污染负荷的能力亦不尽相同。各湖区所制订出的排放标准,必须是既能控制和减轻湖泊的污染程度,又能为当地经济技术条件所能承受,使所制订出的排放标准具有可操作性。在削减总量的分配上,除了应体现“谁污染,谁承担责任”的原则外,还应根据湖区各污染源的位置、排放污染物的种类、数量、排放方式,污染管理的技术水平,经济承受能力等因素的综合分析,采用优化分配、等比例分配、加权分配、多目标评分分配等方法进行计算与比较,求得在污染物削减总量相同情况下,所需治理费用最省的分配方案,以达到区域污染治理总费用最小的目的。

二、基本程序

制订湖泊水污染物排放标准基本程序,大致如下:

1. 收集湖泊及其流域的自然经济概况和湖泊水文、水质、污染现状等方面的基础资料。
2. 进行湖泊水质和污染源的现状评价,确定湖泊的主要污染物和主要污染物的来源。明确排放标准所需控制污染物的项目及控制途径。
3. 根据湖泊水环境质量要求,划分不同的水质功能区,按各功能区的污染现状和水资源使用目标,确定控制污染物的水质标准。
4. 根据历年湖泊水文统计资料分析,确定湖泊的安全设计水量
5. 建立描述湖泊水质与入湖污染物之间定量关系的数学模型。
6. 根据湖泊水质标准,安全设计水量和相应的水质模型,计算出污染物的允许排放量。
7. 根据湖泊污染物的实标来量和允许负荷量,计算出湖泊污染物的削减负荷量。
8. 根据湖区经济技术条件的可行性分析,提出污染物削减总量的分配方案,并按各排污口的入湖污水量,计算出相应排放标准的第一方案。
9. 适当改变水质标准等参数的数值,重复上述4—8的计算步骤,进行反馈计算,求出多组污染物削减总量的分配方案。然后,按污染治理总费用最小的原则,选择最优的分配方案,作为制订排放标准的依据,计算出各排污口相应的排放标准。

三、均匀混合型湖泊的计算方法

(一) 水质模型的确定

均匀混合型湖泊系指面积较小,水深较浅,四周污染源较多的小型湖泊或大湖的湖湾。

污染物进入水体以后,在湖流和风浪的作用下,湖内各处水质浓度的差异甚小,可以近似地当作完全均匀混合的状态看待。对于这类湖泊入湖水污染物排放标准的制订工作,目前大都采用差分(或微分)形式表示的湖泊物质平衡方程,作为允许负荷量计算的理论依据。其基本原理是,某一时段内由各种途径进入湖内污染物质的总量,减去各种途径从湖泊支出污染物总量,应等于该时段内污染物总量的变化。数学表达式为:

$$C = \frac{1}{V}(M_0 + P\Delta t - P'\Delta t) \quad (1)$$

式中: M_0 为时段初湖内污染物的总量(kg); P 为时段内每天由各种途径进入湖内污染物量(kg/d); P' 为时段内每天由各种途径输出湖外污染物量(kg/d); Δt 为所取时段的天数(d); C 为时段末湖内污染物平均浓度(mg/L); V 为时段末湖泊的容积(m^3)。

在实际应用中,因各地湖泊的形态特征、水文条件和入湖污染物性质等因子不一样,所采用的模型亦不完全相同,但不管选用何种概化条件的模型,都必须进行实测资料的验证,只有当计算值与实测值基本吻合的模型才可选用。

按入湖污染物性质和水文条件差异的区分,目前广泛用于反映入湖水污染物与湖水污染物浓度之间相互关系的数学模型,可大致归纳为如下几种情况。

1. 不易分解物质入湖浓度的计算公式

(1) 当入湖水量与出湖水量相等时,这时湖泊内单位时间污染物质变化量计算公式为:

$$V \frac{dc}{dt} = Q(C_1 - C) \quad (2)$$

代入起始条件 $t = 0$ 时,则 $C = C_0$, 进行积分求得 t 时刻湖水平均浓度 C 。

$$C = C_0 + (1 - e^{-\frac{t}{T}})(C_1 - C_0) \quad (3)$$

式中: C_0 为未排入污水前湖水中污染物浓度(mg/L); C_1 为入湖污水中污染物浓度(mg/L); Q 为入湖污水量,亦等于出湖水量(m^3); T 为湖水滞留时间(d); t 为废水入湖时间(d); V 为湖泊平均容积(m^3); 其它符号意义同前。

若要求湖水达到污染物水质标准时,即 $C = C_s$ 时,则可反推得出入湖水污水的浓度 C_1 应为:

$$C_1 = C_0 + \frac{C_s - C_0}{1 - e^{-\frac{t}{T}}} \quad (4)$$

(2) 当流入和流出湖泊水量不相等时,湖泊单位时间内污染物蓄量的变化为:

$$V \frac{dc}{dt} = QC_1 - qC$$

式中: Q 为流入湖泊水量(m^3); q 为流出湖泊水量(m^3); 其它符号的意义同(3)式。

上式代入起始条件 $t = 0$ 时, $C = C_0$, 进行积分求得 t 时刻污染物的浓度 C 为:

$$C = C_0 + (1 - e^{-\frac{t}{T}})(RC_1 - C_0) \quad (5)$$

式中: R 为入湖水量与出湖水量之比即: $R = Q/q$ 。

当要求湖泊污染物浓度达到水质标准时,即 $C = C_s$, 反推求排入湖水污染物浓度 C_1 应为:

$$C_1 = \frac{C_0}{R} + \frac{C_s - C_0}{R(1 - e^{-\frac{t}{T}})} \quad (6)$$

(3)在稳态条件下,入湖水污染物浓度可采用稀释比的计算方法来计算:

$$C_1 = \frac{C_a(Q + q_1) - C_a Q}{q_1} \quad (7)$$

式中: C_1 为入湖水污染物浓度(mg/L); C_a 为湖水污染物的水质标准(mg/L); C_a 为湖泊迳流污染物浓度(mg/l); q_1 为入湖污水水量(m^3/a); Q 为湖泊迳流的入湖水量(m^3/a)。

2. 易降解物质入湖浓度的计算公式

易降解物质进入湖泊水体以后,由于湖水的物理(如沉降等)、化学(如分解等)和生物(如吸收等)等因素的影响,在湖体的滞留期间内会逐渐得到降解,因而其数学表达式需要在前述不降解物质的基础上,增加其自净项的数值,一般的通式为:

$$V \frac{dc}{dt} = Q(C_1 - C) - KVC \quad (8)$$

式中: C 为湖水污染物浓度(mg/L); C_1 为入湖水中污染物浓度(mg/L); V 为湖泊容积(m^3); Q 为入湖水量(m^3); t 为计算时段(d); K 为湖水的综合自净系数(1/d)。

当代入起始条件 $t = 0$ 时, $C = C_0$, 上式积分后得出:

$$C_t = C_0 e^{-(K+\frac{Q}{V})t} + \frac{C_1 Q}{Q + KV} [1 - e^{-(K+\frac{Q}{V})t}] \quad (9)$$

在排放标准的计算工作中,可按湖泊水质标准要求。当 $C = C_s$ 时,反推入湖污染物 C_1 的浓度值。式中 K 值可通过现场调查或室内模拟试验求得。

由于上述公式计算较为复杂,各地学者在实际应用,均取上述方程的稳态解,并寻找模型参数与水文条件关系后,求得较为简单的计算模式。以磷为例,目前应用较广泛的水质模型有如下几种^[4]:

(1) 沃伦维德模型

$$C = C_1 (1 + \sqrt{\frac{Z}{Q^*}})^{-1} \quad (10)$$

式中: C 为湖水年平均总磷浓度(mg/L); C_1 为入湖水按流量加权的年平均总磷浓度(mg/L); Z 为湖泊的平均水深(m); Q^* 为湖泊单位面积上的水量负荷($m^3/m^2 \cdot a$)。

(2) 犹龙模型

$$C = \frac{L_p(1-R)}{Z \frac{Q}{V}} \quad (11)$$

式中: C 为湖水年平均总磷浓度(mg/L); L_p 为湖泊单位面积上总磷负荷量($g/m^2 \cdot a$); Q 为年入湖水量(m^3/a); V 为湖泊的容积(m^3); R 为湖泊总磷滞留系数($R = 1 - \frac{\text{年输出总磷量}}{\text{年输入总磷量}}$)。

(3) 合田健模型

$$C = \frac{L_p}{Z(\frac{Q}{V} + \alpha)} \quad (12)$$

式中: α 为湖水总磷沉降系数(1/d),求得经验系数为 $\alpha = 10/Z$; 其他符号意义同前。

(4) OECD 模型

$$C = C_1 \left(1 + \frac{7}{2^{0.6}} \left(\frac{V}{Q} \right)^{0.6} \right)^{-1} \quad (13)$$

式中:符号意义同前。

(5) 浅水湖与水库规划模型

$$C = C_1 (1 + 2.27 a^{0.588})^{-1} \quad (14)$$

式中: a 为湖水滞留时间(a), $a = \frac{V}{Q_0}$; 其他符号的意义同前。

各地在实际应用中,可根据已收集到资料的实际情况,将各参数的数值代入上述诸种模型进行计算,然后将计算结果与实测资料进行比较,选取计算值与实测值误差最小的水质模型,作为入湖污染物排放标准计算公式。

(二) 模型参数识别

为了使上述模型能够广泛应用于排放标准的计算,首先要解决各模型中参数的求算方法。鉴于上述模型中绝大部分参数均可由现场调查资料中求得,这里仅就易降解物质自净系数(K 值)求算方法介绍如下。

1. 现场调查资料反推法 对于完全均匀混合的小湖或大湖湾,可按物质平衡方程,从某一时段内实测资料反推,求得某污染物的自净系数。其 K 值的计算公式为:

$$K = \frac{W_0 + P\Delta t - P'\Delta t - W_t}{\Delta t W_0} \quad (15)$$

式中: P 为单位时间内进入湖泊污染物数量(kg/d); P' 为单位时间内流出湖泊污染物数量(kg/d); W_0 为时段初湖泊中污染物储量(kg); W_t 为时段末湖泊中污染物储量(kg); Δt 为时段的天数(d); K 为污染物的自净系数(1/d)。

2. 室内试验法 在实验室内,模拟湖泊水域的光照、温度、流动状况等现场条件,观察和测定试验水样中污染物浓度的变化,然后按下式求得污染物的自净系数。

$$K = \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{C_0}{C} \quad (16)$$

式中: Δt 为实验时段的天数(d); C_0 为实验起始时的污染物浓度(mg/L); C 实验时段末污染物浓度(mg/L); K 为某污染物的自净系数(1/d)。

表1 K 值经验系数(1/d)

Tab. 1 Degradation coefficient K by experience

污 染 物 性 质	K 值 范 围
难 降 解 物 质	0.001—0.05
一 般 降 解 物 质	0.05—0.30
易 降 解 物 质	>0.30

3. 经验系数法 由于条件所限,无法按上述方法求得污染物自净系数的湖泊,目前可暂按国内外文献资料,取表1中所示的经验数值。

(三) 计算实例

某城郊湖泊的主要功能是观光游览,并兼有水产养殖及蓄洪防涝。正常水位时面积为 3.7km^2 , 平均水深 1.2m , 容积为 $444 \times 10^4 \text{m}^3$, 流域面积为 20.1km^2 , 沿湖有五条入湖河道汇

集地表径流和 20 多家工厂废水及 15 万多居民生活污水入湖。年输入水量为 $2351 \times 10^4 \text{m}^3$, 其中生活污水为 $760.2 \times 10^4 \text{m}^3$, 主要从 1 号排污口输入。工业废水为 $636 \times 10^4 \text{m}^3$, 主要从 2 号排污口输入。各入湖污水口的入湖量及污染负荷如表 2 所示。

表 2 入湖水量及污染负荷量的统计

Tab. 2 Statistical data of input water discharge and pollutant loading

入湖途径	入湖水量 ($10^4/\text{a}$)	入湖水浓度(mg/L)		入湖污染数量(t/a)	
		COD	TP	COD	TP
湖区径流	595.1	7.0	0.15	41.65	0.89
湖面降水	359.8	3.0	0.04	10.80	0.14
1号排污口	760.2	15.0	0.50	114.03	3.80
2号排污口	562.5	20.0	0.20	112.50	1.12
3号排污口	7.1	15.0	0.15	1.06	0.01
4号排污口	41.3	17.0	0.15	7.02	0.06
5号排污口	25.0	11.0	0.15	2.75	0.04
合 计	2351.0	-	-	289.81	6.06

近期水质调查结果如表 3 所示,表明该湖泊的有机物(COD)和营养物的污染较为严重,如 COD、TP、TN 的年平均值分别为 8.95mg/L、0.48mg/L 和 3.46mg/L,均超过国家规定的水质标准要求。在藻类大量繁殖的季节,湖水透明度在 0.20m 以下,并散发难闻的腥味,严重影响旅游及水上运动的发展。

表 3 湖泊水质调查资料统计

Tab. 3 Observation statistical data of water quality in lake

指- 项 目 标	透明度 (m)	pH	COD _{Mn} (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	DO (mg/L)	酚 (mg/L)	汞 (mg/L)	铜 (mg/L)
年平均值	0.25	8.41	8.95	3.46	0.48	8.64	0.003	未检出	0.008
最大值	0.33	8.98	12.5	6.80	1.18	14.9	0.008	未检出	0.013
最低值	0.12	7.91	6.89	1.04	0.12	3.24	0.002	未检出	0.005
标准值	—	6.5~8.5	5.0	1.0	0.10	>5.0	0.005	0.0001	0.01
超标率(%)	—	33	100	100	100	25	25	0	10

注:湖水标准值取国家地面水环境质量标准(BG3838-88)IV类水质标准的数值。

表 3 的数据表明,该湖的主要污染物是 COD、TP、TN,其超标率均为 100%。但因湖水 N:P 的比值较小(7.27),呈现出 P 为该湖泊富营养化进程控制因子的水体特征。故以 COD 和 TP 作为该湖泊水质污染的控制指标。

参照国家地面水环境质量和该湖泊水域的使用功能的实际状况,分别取 $\text{COD}_{\text{Mn}} = 4.0 \text{mg/L}$, $\text{TP} = 0.1 \text{mg/L}$ 作为该湖水质的控制标准。

1. COD 容量的计算

根据前述排放标准计算方法推定,该湖 COD 环境容量的计算公式为:

$$\bar{W}_{\text{COD}} = K_{\text{COD}} C_s V + C_s Q \quad (17)$$

式中: \bar{W}_{COD} 为 COD 环境容量(t/a); K_{COD} 为湖水 COD 的自净系数(1/d); C_s 为湖泊 COD 的水质标准(mg/L); V 为人工调节最低水位时相应的容积(m^3); Q 为湖泊出湖(或入湖)水量(m^3/a)。

按表 2.3 的资料数据及实验室求得的 COD 自净系数数值,上述各参数的取值为:

$$\begin{aligned} K_{\text{COD}} &= 0.01(\text{L/d}) & C_s &= 4.0(\text{mg/L}) \\ V &= 444(10^4\text{m}^3) & Q &= 2351(10^4\text{m}^3/\text{a}) \end{aligned}$$

将上述数值代入上式,求得该湖 COD 的环境容量为 158.86(t/a)。

2. TP 容量的计算

按前式排放标准计算方法推定,TP 的环境容量计算公式为:

$$\bar{W}_P = QC_p \left(1 + \sqrt{\frac{z}{Q^*}}\right) \quad (18)$$

式中: \bar{W}_P 为湖泊 TP 的环境容量(t/a); Q 为入湖水量(m^3/a); C_p 为湖水 TP 的水质标准(mg/L); z 为湖泊平均水深(m); Q^* 为湖泊单位面积上的水量负荷($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{a}$)。

据前述基础资料分析,上式中各参数的取值分别为:

$$\begin{aligned} Q &= 2351(10^4\text{m}^3/\text{a}) & C_p &= 0.1(\text{mg/L}) \\ z &= 1.2(\text{m}) & Q^* &= 6.345(\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{a}) \end{aligned}$$

将各参数代入上式,求得该湖 TP 的环境容量为 3.37(t/a)。

3. COD、TP 削减量计算及排放标准的确定

用表 2 所示 COD、TP 实际入湖量减去它们的环境容量,分别求得该湖 COD 相应的削减量为 130.95(t/a),TP 相应的削减量 2.69(t/a)。由于湖面降水,地表径流等面源治理难度大,所需投资费用亦多,3、4、5 号排污口排污量较小,只占排污总量的 1—2%,故将 COD 和 TP 的削减量按其污染负荷比,分别分配给 1、2 号排污口较为合理。3、4、5 号排污口的排污单位按应承担的削减量,向 1、2 号排污单位缴纳所应分摊的处理费用。

按上述分摊办法,求得该湖泊各排污口的排放标准如表 4 所示。

表 4 各排污口排放标准计算结果

Tab. 4 Calculated results of emission standards of waste sources

入湖途径	COD			TP		
	容许排放量 (t/a)	削减率 (%)	容许排放浓度 (mg/L)	容许排放量 (t/a)	削减率 (%)	容许排放浓度 (mg/L)
湖区径流	41.65	0	7.0	0.89	0	0.15
湖面降水	10.80	0	3.0	0.14	0	0.04
1号排污口	48.16	57.8	6.34	1.72	54.7	0.23
2号排污口	47.42	57.8	8.43	0.50	55.3	0.09
3号排污口	1.06	0	15.0	0.01	0	0.15
4号排污口	7.02	0	17.0	0.06	0	0.15
5号排污口	2.75	0	11.0	0.04	0	0.15

参 考 文 献

- [1] 顾丁锡、舒金华。湖泊污染预测及其防治规划方法。北京,中国环境科学出版社,1988。
- [2] 金传良等。制订地方水污染物排放标准的技术原则和方法(GB3839-83),北京,国家标准出版社,1983。
- [3] 祝兴祥。试论我国水污染物排放许可制度的实施。中国环境科学,1992,1(26)。
- [4] 合田健。水环境指标。思考社,1979。
- [5] 舒金华等。入太湖水中三态氮水质模拟的研究。环境科学学报,1986,(2)。

PRINCIPLE AND METHOD OF LAKE WATER POLLUTANT EMISSION STANDARDS (I)

Shu Jinhua

(*Nanjing Institute of Geography & Limnology, Nanjing 210008*)

Abstract

According to "the protective method of water pollution" an emission licence system of water pollutant, and lake water pollution situation, the technical principle, work programme and calculated methods of water pollutant emission standards were put forward with some calculated samples in different typical lakes for the use of local lake management departments in making the local water pollutant emission standards.

Key words Lake, water pollutant, emission standard, water quality model