

亚热带水体营养状态定量评价及预测研究

杨 扬^{1,2} 刘明清² 吴振斌¹ 韩静磊²

(1. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072;

2. 国家环境保护总局华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要: 采用相关加权营养状态指数法对 H 水库营养状态进行连续的数值化分级评价, 准确反映了该水库的营养状态发展阶段和富营养化发展过程, 克服了固定参数值评价湖泊、水库营养状态的局限性和重叠现象。根据湖泊外力函数(主要是外来性营养盐浓度或负荷)与湖内营养状态响应间的定量关系及 OECD 国际合作组织研究成果, 提出了 H 水库营养盐输入负荷与库中磷浓度响应关系数学模型, 确定了在水体功能改变后, 其磷允许负荷量及控制标准, 结果与实际相符。

关键词: 饮用水源; 营养状态; 评价; 预测

中图分类号: X824 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2001)03-0230-06

亚热带水体富营养化评价、管理与控制, 应引起高度重视。由于热带/亚热带地区气候特征的影响, 水体富营养化、生态破坏与水质恶化等环境问题出现频率较其他地区更高, 从而导致湖泊、水库水环境的污染, 影响人类对水这一基本而有限资源的利用。如何达到湖泊和水库最主要功能或多种用途的最低限度的水质要求和营养状态, 是对富营养化水体实施有效的控制管理的根本目的。营养分类, 特别是富营养化评价已日益成为水体功能划分的基础, 也是制定湖泊、水库水质管理目标的重要依据。本工作利用国内外营养状态的评价方法在我国的适用性的研究成果, 结合我国大陆最南端沿海地区湛江市 H 水库供水工程项目, 提出了可靠的适用于我国亚热带水体营养状态评价与管理的负荷——响应关系和预测模型, 供湖泊和水库富营养化的评价、规划和管理参考。

1 材料与方法

H 水库位于广东省湛江市北纬 $21^{\circ}10'$, 东经 $110^{\circ}20'$, 拦截九州江主流, 集雨面积 1495km^2 , 库区面积 431km^2 , 总库容 11.44亿 m^3 , 多年平均入库水量 14.73亿 m^3 , 弃水(发电、无益弃水) 4.52亿 m^3 , 损失 1.48亿 m^3 , 可供水 8.80亿 m^3 。目前是以农灌为主的大型水库, 随着该地区经济高度发展亟需开发新的水源, 该水库主要功能将转变为供水源地。

1.1 调查时间 平水期监测于 1998 年 5 月 8—16 日, 丰水期监测于 1998 年 7 月 20—28 日进行。

收稿日期: 2000-08-10; 修订日期: 2000-11-10

作者简介: 杨 扬, (1960—) 女, 河南省漯河市; 高级工程师; 主要从事水体污染生态学、生态毒理学、环境生物技术研究, 在读博士。

1.2 监测点布设 根据 H 水库的环境特征, 在库区设置 5 个采样点, 采样点位布设见图 1。S24 为水库进口控制点, S17 设在水面开阔带, 代表水库主体部分的库心位置, S13 设在库湾位置, S11、S10 为水库出口控制点。

1.3 调查项目及分析方法 采用国家环保局相关方法^[1-2] 测定水温、透明度、浮游植物数量、生物量、叶绿素 a、总磷、氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮等。

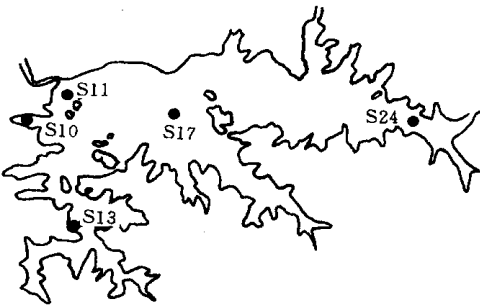


图 1 H 水库形态及监测点布设简图
Fig. 1 Location of sampling stations in H Reservoir

2 结果与讨论

2.1 调查结果

H 水库平、丰水期各监测点位营养指标调查结果平均值见表 1。

表 1 各水体营养指标测定结果
Tab. 1 Nutrient index in the reservoir at different sites

参数 Parameter	站 点 Sites				
	S10	S11	S13	S17	S24
浮游植物 Phytoplankton (10 ³ 个/L)	42. 16	133. 74	50. 54	64. 92	71. 62
透明度 Diaphaneity(m)	7. 00	7. 20	5. 70	6. 80	2. 40
叶绿素 a Chlorophyll (ug/L)	1. 72	2. 84	1. 91	1. 71	1. 90
总磷 T- phosphorus(ug/L)	17. 00	17. 00	19. 00	21. 00	31. 00
总氮 T- nitrogen(ug/L)	556. 00	617. 00	587. 00	457. 00	1490. 00

2.2 营养状态评价

2.2.1 水库的用途和营养状态关系 根据 OECD(国际经济与合作开发组织) 提出的湖泊、水库的利用及有关的营养状态条件^[3], 并满足 H 水库水体的多种用途及供水功能的主要用途, 制定下列评价要求原则(表 2)。

表 2 H 水库的利用及有关的营养状态条件
Tab. 2 The utilization and relative nutrient states of H Reservoir

水的设计用途 Design purpose of the water	营养状态 Nutrient status	
	需要的 Needed	尚可忍受的 Endurable
饮用水 Drinking water	贫营养	中营养
渔业养殖 Aquiculture	—	富营养
能源(发电) Energy source	—	重富营养
航运 Shipping	—	无要求
灌溉 Irrigation	—	重富营养
旅游(不包括游泳) Tour	中营养	富营养

2.2.2 相关加权营养状态指数法评价 虽然对热带水体尚需进一步研究探讨, 但已有迹

象表明, 水体富营养化、贫营养化的特征在温带水体和热带/ 亚热带水体基本没有本质上的差别, 其营养状态的差别, 主要表现在发展的程度上和发生的时间上。因此在定量描述热带水体的营养状态时, 温带湖泊通用的营养状态评价方法也适用于热带水体。本次工作所采用的营养状态指数法, 对湖泊、水库营养状态进行了连续的数值化的分级, 该方法为目前湖泊、水库富营养化定量研究最准确的方法之一, 也应是今后湖泊富营养化评价中的主要方法^[4]。

综合多项营养状态指标, 包括湖水透明度、藻类叶绿素 a 含量以及湖水总磷、总氮浓度并将其转换为营养状态指数(TSI), 从而对 H 水库营养状态进行连续分级的方法。相关加权综合营养状态指数为:

$$TSI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TSI(j)$$

式中: TSI(Σ) —— 表示综合营养状态指数; W_j —— 第 j 种参数的相关权重; m —— 选取评价参数个数; TSI(j) —— 表示第 j 种参数的营养状态指数。

表 3 TSI(Σ) 与营养类别的对应关系

Tab. 3 Corresponding relation between TSI(Σ) and nutrient class

营养类别 Nutrient class	贫营养 Oligotrophication	中营养 Mesotrophication	富营养 Eutrophication
TSI(Σ)	≤30	≤50	> 50

2.2.3 评价结果 按照 TSI(j) 指数的公式计算, H 水库各点位的计算结果如表 4。相关加权综合指数法评价结果表明, H 水库进水区域 S24 点, 处在中—富营养过渡阶段, 水库主体基本呈现贫—中营养过渡阶段, 而越到水库出口区域 S11、S10 点则水质越好。根据上述评价结果, 基于 H 水库水体功能, 建议 H 水库水质管理目标及水体功能分区见表 5。

表 4 相关加权综合指数法评价 H 水库营养状态结果

Tab. 4 Assessment of nutrient status in the reservoir

采样点位 Site	TSI						营养分级 Nutrient class
	参数	Chla	TP	TN	SD	平均值	
S24	4M	42	41	63	49	49	中—富
S17	4M	25	32	36	35	32	贫—中
S13	4M	24	42	25	39	33	贫—中
S10	4M	26	28	30	41	31	贫—中
S11	4M	23	28	32	31	29	贫

2.3 磷允许负荷量及控制标准

从危害人体健康角度来看, 水体中过多的磷的存在, 对人体并未有多大威胁。正如 Golterman 所指出, 磷在一定时期内是某种藻类生长的限定性因素, 这并不太重要, 重要的是磷可以通过减少输入水体外部负荷或者湖内控制对策而成为限定性因素, 因为磷是能够容易成为限定藻类生长的惟一的基本营养盐。评价氮是否是需控制的营养盐或存在健康问题, 提供鉴别湖泊、水库内明显的氮源及选择有效的控制对策, 可以对氮有一定程度的控制。但是, 除非氮是饮用水水库内影响健康的因素(例如, 总氮浓度 < 10mg/L 对人类的健康是安全的)。根据对 H 水库营养盐现场监测, 库中氮与磷的含量远高于藻类生

长所需要的氮磷比(7. 2: 1)(表 1), 为典型的磷控制水库、即磷成为限制藻类生长的主要因子。故该水库仅采取磷控制。

表 5 H 水库的利用及有关的营养状态条件的区域划分

Tab. 5 The utilization of H reservoir and regional divisions of relation nutrient status

水的设计用途	水库 区域
Design purpose of the water	Reservoir regions
饮用水(贫- 中营养状态)	取水口应设在水库出水区域, 如 S11、S10 区域
渔业养殖(富营养状态)	网箱养殖应设在上游库湾区域, S13 区域
能源(发电)(重富营养状态)	应尽量利用水库上游区域
航运	避开饮用水取水区域
灌溉(重富营养状态)	应尽量利用水库上游水源
旅游(不包括游泳)(中- 富营养状态)	应远离饮用水源区域

2. 3. 1 预测模型的选择 湖泊营养盐负荷与湖中营养状态响应关系模型应用最为广泛的是世界著名湖泊专家 Vollenweider 根据湖泊质量平衡原理所建立的磷浓度预测模型以及后来进一步修正的磷负荷模型。该模型揭示了入湖磷浓度或磷负荷与湖中总磷浓度之间的原因——作用响应关系以及主要因素, 如湖泊深度、水滞留时间和水力负荷等, 并不涉及湖泊富营养化过程的细节, 而是以年为时间尺度来研究湖泊营养负荷输入量与湖中营养盐浓度间的响应关系, 即根据总磷的年均值来求目标。虽然这类统计模型简单, 不如动态模型细致、准确, 但是大量应用实践表明, 这类模型在确定湖泊营养负荷目标及预测湖泊治理对策的效益时, 比动态模型更具优越性。当评价已知水体磷负荷的作用时, 用负荷响应关系比浓度响应关系更合适, 这是因为, 负荷响应关系通过了湖泊水体稳定态的和最终的响应, 而采用磷浓度评价磷负荷改变所引起的响应的合理性, 很大程度上取决于监测时期的水质是否达到稳态条件。该类模型近年来又被 OECD 国际合作研究做了进一步修改完善。Rast 等指出, OECD 模型对于大范围的温带水体都是适用和准确的; J. A. Thornton 和 Walmsley 认为, 这些模型对于评价热带水体也很有用的^[7]。

根据 H 水库磷负荷值, 以国际上经多个湖泊验证的负荷—湖中响应模型^[8]为基础, 对 H 水库中营养响应结果进行计算, 并与实测值做比较, 结果见表 6。

表 6 结果可见, 上述模型中, 显然 OECD 水库模型(3, 6) 的预测值与 H 水库的实测值较为相近, 特别是采用磷浓度和磷负荷两类模型所预测的湖中浓度值呈现相同的结果, 表明 OECD 水库模型适用于 H 水库。

2. 3. 2 近、远期营养状态响应目标值确定 考虑到经济、技术条件, H 水库磷允许负荷量及控制标准拟分为近期及远期目标。为利于管理, 采用总量及浓度双重控制形式。根据国家地面水环境质量标准, 生活饮用水源要执行 II 类水标准以及满足饮用水源的营养状态为贫营养或达到尚可忍受中营养的要求。利用公式:

$$TSI_{(TP)} = 10 \left[6 - \frac{\ln(48/TP)}{\ln 2} \right]$$

与公式:

$$[\overline{Chl}] = 0.52[\overline{P_N}]^{0.82}$$

计算出营养状态近远期控制标准与警戒标准如表 7。

表 6 几种负荷—响应关系的预测值与实测值的比较
Tab. 6 Comparison of predicting and actual responding values

序号 No.	模 型 Models	库中响应参数(mg/ L) Responding values	
		预测值	实测值
		Predictable Values	Actual Values
1	$[P_N] = [P_j] j \frac{1}{1 + tw}$ (Vollenweder 模型)	0.0230	0.0163
2	$[P_N] = 1.55 [P_j] / (1 + \sqrt{tw})^{0.82}$ (OECD 模型)	0.0205	0.0163
磷浓度预测模型	3 $[P_N] = [P_j] \frac{1}{1 + 2.27 t_w^{0.86}}$ (OECD 水库模型)	0.0157	0.0163
	4 $[P_N] = \frac{L_p/q_s}{1 + \sqrt{tw}}$ (Vollenweder 模型)	0.0230	0.0163
	5 $[P_N] = 1.55 \left\{ \frac{L_p/q_s}{1 + \sqrt{tw}} \right\}^{0.82}$ (OECD 湖泊模型)	0.0204	0.0163
磷负荷预测模型	6 $[P_N] = 1.02 \left\{ \left[\frac{L_p/q_s}{1 + \sqrt{tw}} \right] \right\}^{0.88}$ (OECD 水库模型)	0.0162	0.0163

注: 表中符号: $[P_N]$ —湖中 TP 的年平均浓度; $[P_j]$ —输入 TP 年平均浓度; Z —湖泊平均深度(m); q_s —湖泊单位面积水量负荷= Q/A ; Q —湖泊年流入水量; A —湖泊表面积; tw —水力停留时间(年), = V/Q ; V —库容; L_P —湖泊输入磷的年面积负荷, = L/A , L —湖泊磷负荷输入年总量。

表 7 H 水库营养状态控制标准
Tab. 7 Objective control standards of nutrient status

标准 Standard	TSI	TP(mg/ L)	Chla(μg/ L)
近期标准 Short term	30	0.018	5.5
远期标准 Long term	25	0.016	5.0
警戒标准 Warning	35	0.025	7.3
富营养化控制标准 Eutrophic	50	0.065	15.9
国家地面水 II 类标准 State standard of Class		≤0.025	
营养状态指数(TSI) 标准 TSI standard	≤30 贫营养	≤50 中营养	50 富营养

2.3.3 磷允许负荷量 将H 水库近、远期及警戒标准, 代入 OECD 水库模型 3, 6(表 7) 中, 可求得 H 水库磷允许负荷量及输入浓度(表 8)。

表 8 H 水库磷允许负荷及年平均入水浓度
Tab. 8 P allowable loading and annual average inflow concentration

标准及负荷 目标	营养状态控制标准		磷允许负荷及浓度		
	TP(mg/ L)	Chla(μg/ L)	面积负荷 g/ m ² · a	入库总量(t)	入库口平均浓度(mg/ L)
近期目标	0.018	5.5	0.98	69.3	0.046
远期目标	0.016	5.0	0.87	61.6	0.041
警界目标	0.025	7.3	1.36	96.2	0.051
富营养化控制标准	0.065	15.9	5.45	385.1	0.255

2.3.4 预测结果 鉴于 H 水库营养负荷大部分来自农田地表径流及生活污水的分散排放, 截流治理有较大难度, 故制定分期控制标准, 可分期实施。近期目标控制在库中总磷年平均浓度为 0.018mg/L , 进水浓度不超过 0.046mg/L ; 通过逐步的污染源(点、面源)治理措施的实施, 将水库进水年平均总磷浓度控制在 0.041mg/L 以内, 库中总磷浓度为 0.016mg/L 。当进水年均总磷浓度超过 0.255mg/L , 库中总磷浓度超过 0.065mg/L 时, H 水库将发生富营养化。

本文采用营养状态指数的分级标准和磷负荷——库中响应关系模型对 H 水库进行营养状态综合评价和富营养化控制标准制定, 简单准确, 易于操作, 在热带/亚热带地区具有广泛的适用性。应用此模型评价结果表明, H 水库水体适合用作饮用水源地, 水库作为饮用水源, 必须控制磷负荷在 $1.36\text{g/m}^2 \cdot \text{a}$ (96.2t/a) 以下, 年入库口平均浓度不超过 0.051mg/L 。

参考文献:

- [1] 国家环境保护总局编, 湖泊富营养化调查规范[M], 北京: 中国环境出版社, 1987
- [2] 国家环境保护总局编, 水生生物监测手册[M], 南京: 东南大学出版社, 1993, 176—182
- [3] Edited by Sven O. R. and Walter R.: The control of eutrophication of lakes and reservoirs[M], 北京: 中国环境科学出版社 1992, 35—234
- [4] 天津市环境保护科学研究所编, 于桥水库富营养化及防治研究[R], 1991, 98—108

STUDIES ON QUANTITATIVE ASSESSMENT AND PREDICTION OF NUTRIENT STATUS IN THE SUBTROPICS WATERS

YANG Yang^{1,2}, LIU Ming qing², WU Zherbin¹ and HAN Jing lei²
(1. *Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072;*
2. *South China Institute for Environmental Sciences, SEPA, Guangzhou 510655*)

Abstract: This paper presents the quantitative assessment and prediction results of the nutrient states in the subtropic/tropic waters. By using the method of relative weighed nutrient status index, the nutrient states of H Reservoir were continuously and numerically assessed. it revealed the steps of nutrient development and processes of eutrophication, which overcame the limitations and overlaps of nutrient status assessments for lakes and reservoirs by using fixed parameters. Based on the responding relation between lake external force functions (mainly the concentrations or loadings of external nutrient salts) and the research result of international cooperative organization of OECD, mathematical models of phosphorus concentrations of H Reservoir responding to nutrient salts inflow loadings and control standards are put forward and the results are identical with reality. Assessing methods and predicting models raised in this paper could also be applied to other lakes and reservoirs in the subtropics/tropics.

Key words: Drinking water resources; Nutrient states; Assessment; Prediction.