

确定太湖流域湖库总磷参照浓度的改进 MEI 模型*

顾莉^{1,2,3}, 李秋兰³, 华祖林^{1,2,3**}, 洪波⁴

(1: 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

(2: 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 南京 210098)

(3: 河海大学环境学院, 南京 210098)

(4: 北京中安质环技术评价中心有限公司, 北京 100022)

摘要: 太湖流域湖泊污染严重, 非常有必要建立相应的水质基准以便于湖泊水体的保护与修复. 根据太湖流域 12 个受人类影响较小的湖库及太湖早期的总磷、总碱度、平均水深等数据建立了 MEI (morphoedaphic index) 模型, 通过对模型中总磷与总碱度、平均水深因子的相关关系进行分析, 并结合太湖流域湖库水深较浅的特征, 提出了确定太湖流域湖库水体中总磷参照浓度的改进 MEI 模型. 将该模型应用于太湖, 得到太湖总磷参照浓度为 0.025 mg/L. 研究结果旨在丰富我国水体营养物基准的确定方法, 并为太湖流域水体富营养化的控制提供理论依据, 同时为长江中下游类似湖库水质基准的建立提供技术支撑.

关键词: 总磷; 参照浓度; 太湖流域; 改进 MEI 模型

The improved MEI model for forecasting TP reference concentration in Lake Taihu basin

GU Li^{1,2,3}, LI Qiulan³, HUA Zulin^{1,2,3} & HONG Bo⁴

(1: *Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China*)

(2: *National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China*)

(3: *College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China*)

(4: *Beijing Zhongan Quality Assessment Center, Central Technology, Beijing 100022, P. R. China*)

Abstract: In view of the status of serious pollution in Lake Taihu basin, it is necessary to establish an appropriate water quality criteria to protect and restore the lake environment. According to the data on total phosphorus, total alkalinity, mean water depth in 12 reservoirs and lakes with little human influence in Lake Taihu basin as well as the early-time (pre-industrial) data in Lake Taihu, a morpho edaphic index (MEI) model was built. The correlations between TP and two factors, which are mean water depth and total alkalinity in MEI model, were analyzed, respectively. Considering the fact that all the lakes in Lake Taihu basin are shallow, the improved MEI model was proposed. Then the improved MEI model was used to determine TP reference concentration in Lake Taihu. The result showed that the reference concentration of TP was 0.025 mg/L. This study is aimed at diversifying the methods of nutrient criteria research in China, and providing theoretic support for eutrophication control in Lake Taihu basin as well as establishing nutrient criteria for similar lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River.

Keywords: TP; reference concentration; Lake Taihu basin; improved MEI model

太湖流域是我国经济最发达的地区之一, 流域社会经济的蓬勃发展对流域内湖泊产生了很大的影响,

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2012ZX07103-005)、国家自然科学基金项目(51009048, 50979026, 51179052)、国家科技支撑计划项目(2012BAB0304)、国家重点基础研究发展计划“973”项目(2008CB418202)和江苏省六大人才高峰计划项目(08-C)联合资助. 2012-09-03 收稿; 2012-11-26 收修改稿. 顾莉, 女, 1981 年生, 博士, 副教授; E-mail: guliq@hhu.edu.cn.

** 通信作者; E-mail: zulinhua@hhu.edu.cn.

湖泊水质日益下降,富营养化现象严重,且对周边居民的生产和生活造成一定的影响^[1-6].为了控制太湖流域湖泊的富营养化现象,针对太湖流域的水质基准的制订势在必行.目前对湖库水质参照状态的研究方法主要有频率分布法、古湖沼学重建法(沉积物反演法)、历史数据和专家评价法、模型预测和推断法等^[7-12].由于太湖流域经济发展较早,人类活动影响较大,而水质监测数据又相对缺乏,频率分布法、历史数据推断法不太适用于历史监测资料缺乏或污染严重的湖泊,因此这两种方法的应用受到了很大的限制;古湖沼学重建法需要复杂的数据分析和专家判断,且也不太适用于沉积物受扰动较大的浅水湖泊,只能作为其他方法的参照验证^[13];而模型预测法则可以用于受人类影响较严重的湖泊参照状态的确定,以其经济上和技术上的可行性而倍受青睐^[7].

MEI(morphoedaphic index)模型最早由 Rawson 提出,即湖深-溶解性固体指数,是指湖水中总可溶性固体与湖泊平均深度之比.它最早主要用于评估湖泊鱼类含量的多少^[14],后经 Vighi 等^[15]和 Cardoso 等^[16]改进,用于估计湖泊总磷本底浓度,其理论主要基于以下3点假设:1)流域中土壤的流失以及岩石的风化是该流域湖泊离子以及磷的主要来源,不同流域磷含量的多少很大程度上取决于该流域离子的输入量,因而,天然水体中总离子含量(可用总碱度和电导率表示,本文采用总碱度作为代表)和水体磷含量存在很好的正相关关系.2)总碱度在受人类活动影响较小的地区含量是相对稳定的,所以可作为湖泊磷参照浓度的预测因子.3)对于水深较大的湖泊,磷含量和水深呈负相关关系^[16].

本文在传统 MEI 模型的基础上,结合太湖流域多为浅水湖泊的特点,通过模型数据分析提出了改进的 MEI 模型,并在太湖中进行应用,得到了太湖总磷的参照浓度.通过与其他方法所得太湖总磷参照浓度的验证可知改进的 MEI 模型正确可行.

1 确定太湖流域湖库总磷参照浓度的改进 MEI 模型的建立

1.1 数据收集

1.1.1 资料数据 数据收集的原则是所选湖泊或水库要尽量处于天然状态或受人类活动影响程度较小.基于以上原则遴选了太湖上游12个湖库,收集了总磷(TP)、总碱度(ALK)、平均水深、MEI 4个因子的数据,并收录了太湖1987年的早期相关数据(表1).其中,MEI = 总碱度/平均水深.

1.1.2 实测数据 为丰富建模所用数据,于2010年1月23-25日,先后前往太湖上游的江苏省横山水库、浙江省对河口水库采集水样,采样点位置见表1.现场实测水深,水样经预处理后送实验室分析总磷、总碱度含量,水深采用自制连杆测量;总磷、总碱度分别采用《水和废水监测分析方法(第四版)》中的钼酸盐分光光度法和酸碱指示剂滴定法测定.监测结果见表1.

1.2 传统 MEI 模型的建立

利用表1数据,按照传统 MEI 模型的理论建立总磷-MEI 预测模型:

$$\lg TP = 0.6491 \lg MEI + 0.7348 \quad (1)$$

总磷与 MEI 呈一定程度的正相关,相关系数 R^2 为 0.685, F 检验结果为 32.659(图 1a).这说明,在人类活动影响较小的情况下,太湖流域湖泊水库总磷主要来源于上游地区岩石风化以及土壤中离子的流失,总磷与 MEI 在水体中存在一定程度上的相关关系,但并不显著,因此本文对传统 MEI 模型中平均水深和总碱度这两个因子与总磷的关系分别进行讨论,希望对传统 MEI 模型进行改进,以期得到与太湖流域总磷浓度相关关系更好的模型.

1.3 改进 MEI 模型的建立

对表1数据中总磷和平均水深进行回归分析可以看出,总磷与水深相关性较差(图1b).这是因为太湖流域的湖泊、水库水深较浅,与 Vighi 等^[15]建模所选用的北美及欧洲共53个湖库及霍守亮等^[7]研究时选用的云贵高原湖区湖库均为高纬度地区深水湖泊不同,太湖流域湖库水深对总磷浓度分布的影响较小,如果单纯套用传统 MEI 法将水深与总碱度一起作为预测总磷的变量,所得结果反而会降低总磷与 MEI 的相关性,因此本文剔除水深这一因子,尝试建立适合太湖流域浅水湖泊特性的总磷-总碱度模型.

对表1数据建立总磷-总碱度预测模型:

$$\lg TP = 0.9504 \lg ALK - 0.0782 \quad (2)$$

总磷与总碱度呈较好的正相关关系,相关系数 R^2 为 0.868, F 检验结果为 111.113(图 1c),结果明显好于传统 MEI 模型中总磷与 MEI 之间的关系。

通过以上分析,可以得到确定太湖流域湖库总磷参照浓度的改进 MEI 模型。

表 1 数据汇总*
Tab. 1 Summary data

水库(湖泊)名称	所处位置	总磷	总碱度	平均水深	MEI	数据来源
仓山水库	山区丘陵	0.042	83.00	5.0	16.60	文献[17-18]
墓东水库	山区丘陵	0.036	54.40	5.0	10.88	文献[17-18]
茅东水库	山区丘陵	0.042	80.10	5.0	16.02	文献[17-18]
塘马水库	山区丘陵	0.032	77.50	1.9	40.79	文献[17-18]
前宋水库	山区丘陵	0.030	54.90	3.7	14.84	文献[17-18]
大溪水库	山区丘陵	0.057	43.10	4.5	9.58	文献[17-18]
天目湖水库	山区丘陵	0.063	79.00	3.3	23.94	文献[17-18]
横山水库	山区丘陵	0.044	52.00	6.0	8.67	文献[17-18]
对河口水库	山区丘陵	0.007	10.22	7.0	1.46	文献[17-18]
长荡湖	平原河网	0.116	101.00	1.4	72.14	文献[17-18]
溇湖	平原河网	0.059	94.00	1.2	78.33	文献[17-18]
西次	平原河网	0.108	124.00	1.5	82.67	文献[17-18]
横山水库 H1 (31°14'43"N, 119°33'55"E)	山区丘陵	0.020	32.32	—	—	实测数据
横山水库 H2 (31°13'54"N, 119°32'26"E)	山区丘陵	0.017	32.65	2.5	13.06	实测数据
横山水库 H3 (31°13'36"N, 119°34'14"E)	山区丘陵	0.016	31.98	3.0	10.66	实测数据
对河口水库 D1 (30°31'45"N, 119°53'30"E)	山区丘陵	0.008	13.33	—	—	实测数据
对河口水库 D2 (30°31'43"N, 119°53'18"E)	山区丘陵	0.013	10.66	2.7	3.95	实测数据
对河口水库 D3 (30°30'57"N, 119°52'10"E)	山区丘陵	0.005	6.66	1.8	3.70	实测数据
太湖	平原河网	0.029	37.49	2.1	17.85	文献[5,19]

* 水深单位为 m,总磷、总碱度单位均为 mg/L;总碱度采用氧化钙碱度。

2 模型在太湖中的应用

太湖 1960 年总碱度实测值为 25.88 mg/L^[5], 此时太湖受人类活动影响很小,将该值代入以上确定太湖流域湖库总磷参照浓度的改进 MEI 模型,得到太湖总磷浓度为 0.018 mg/L。另外,于 2010 年 1 月 25—26 日前往受人类活动影响较小的太湖湖心区域进行采样,共设了 6 个采样点,各采样点位置及总碱度实测数据见表 2,由此得到太湖的现状总碱度平均值为 46.4 mg/L。同样,将该值代入上述模型,得到太湖总磷的浓度为 0.032 mg/L。

本文将 1960 和 2010 年太湖两次实测总碱度值代入确定太湖流域湖库总磷参照浓度的改进 MEI 模型中,得到太湖总磷的参照浓度分别为 0.018 和 0.032 mg/L。计算所得 1960 年太湖 TP 浓度基本对应于天然状态下的背景浓度值,可作为参照浓度的下限;2010 年所得太湖 TP 浓度对应于受一定人类活动影响下水土流失量增大情况下的太湖背景浓度值,可作为参照浓度的上限。考虑到在实际应用中的简便,取平均值 0.025 mg/L 作为太湖总磷的参照浓度。

表 2 采样点位置及总碱度实测值
Tab. 2 Location of sampling sites and field monitoring data on total alkalinity

采样点	总碱度/(mg/L)	纬度	经度
T1	50.3	31°18'50"N	120°5'6"E
T2	43.2	31°17'38"N	120°11'3"E
T3	48.8	31°15'54"N	120°6'10"E
T4	44.9	31°15'47"N	120°8'30"E
T5	47.3	31°11'23"N	120°6'45"E
T6	43.8	31°11'54"N	120°9'36"E

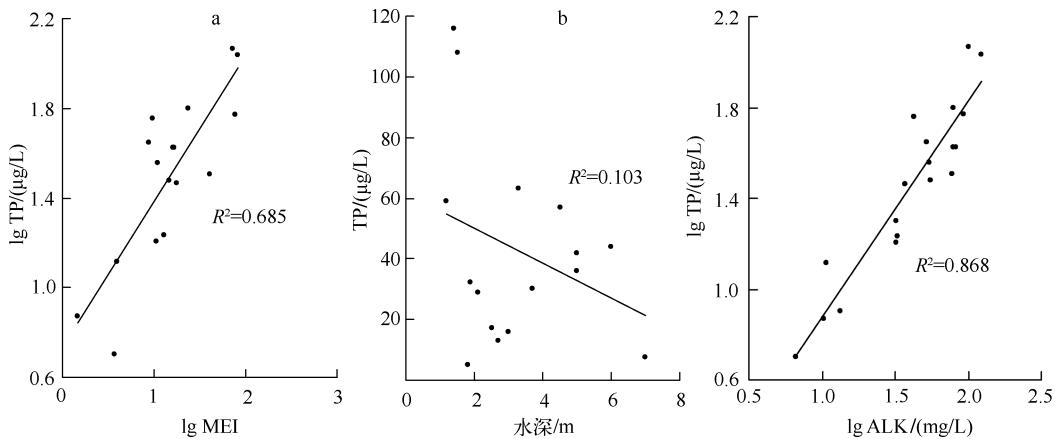


图1 总磷与 MEI(a)、水深(b)和总碱度(c)相关关系

Fig. 1 The relationships of TP to MEI (a), mean depth (b) and total alkalinity (c)

3 模型验证及结论

为了确定该模型是否可行,我们参阅了大量文献,利用前人的研究进行了时间参照法、沉积物反演法等多项验证。

1) 时间参照法验证. 1960年6月15日—8月25日,中国科学院南京地理研究所联合多家单位对太湖进行一次调查,调查结果显示总磷浓度在0.01~0.05 mg/L之间,当时太湖还处于未受污染的天然状态^[3]. 本文通过改进的 MEI 法计算得到的总磷参照浓度平均值为0.025 mg/L,符合历史数据范围,说明通过该方法建立太湖总磷参照浓度的方法是基本可行的。

2) 沉积物反演法验证. 董旭辉等基于长江中下游湖群硅藻与总磷函数关系及沉积物钻孔的高分辨率硅藻研究,定量重建了龙感湖和太白湖两个湖泊湖水总磷历史浓度^[20-22]. 结果显示龙感湖在过去200年来,总磷浓度变幅较小,在0.036~0.062 mg/L之间;太白湖在1953年前,总磷浓度稳定在0.05 mg/L左右。

以上数据表明对于长江中下游湖群处于天然状态时总磷浓度应该低于0.062 mg/L,这从另一个侧面为本文确定的太湖总磷参照浓度为0.025 mg/L提供了佐证。

3) 频率分布法验证. 郑丙辉等通过收集太湖全湖1987—1988、1994—2005年数据,运用频率分布法(下5%频率对应的总磷浓度)提出太湖总磷参照浓度为0.03 mg/L^[23],该方法确定的参照浓度接近本文参照浓度值,由此可知本文所得到的总磷参照浓度为0.025 mg/L是合理可信的。

以上多种方法的验证都表明该改进的 MEI 模型的预测结果非常合理。

本文提出了确定太湖流域湖库总磷参照浓度的改进 MEI 模型 $\lg TP = 0.9504 \lg ALK - 0.0782$,并由此得到太湖总磷参照浓度平均值为0.025 mg/L. 该改进的 MEI 模型可用于太湖流域湖泊、水库的总磷参照浓度的确定,为长江中下游类似湖库的营养盐基准的确定以及污染控制提供了有力的技术支撑。

致谢: 河海大学环境学院研究生单宁宁、于徐华、戴本林等帮助野外采样及完成实验分析,在此表示衷心感谢!

4 参考文献

- [1] 范成新. 太湖水体生态环境历史演变. 湖泊科学, 1996, 8(4): 297-300.
- [2] 陈奇, 霍守亮, 席北斗等. 云贵高原湖区湖库总磷和叶绿素 a 浓度参照状态研究. 环境工程技术学报, 2012, 2(3): 184-191.
- [3] 中国科学院南京地理研究所. 太湖综合调查初步报告. 北京: 科学出版社, 1965: 84.
- [4] 李文朝. 浅水湖泊生态系统的多稳态理论及其应用. 湖泊科学, 1997, 9(2): 97-104.

- [5] 孙顺才,黄漪平.太湖.北京:海洋出版社,1993:271.
- [6] 杨桂山,王德建.太湖流域经济发展·水环境·水灾害.北京:科学出版社,2003:308.
- [7] 霍守亮,陈 奇,席北斗等.湖泊营养物基准的制定方法研究进展.生态环境学报,2009,18(2):743-748.
- [8] Gibson G, Carlson R, Simpson J *et al.* Nutrient criteria technical guidance manual: lakes and reservoirs(EPA-822-B-00-001). Washington DC: United States Environment Protection Agency, 2000.
- [9] Solheim AL. Reference conditions of european lakes; Indicators and methods for the water framework directive assessment of reference conditions, 2005: 105.
- [10] Dodds WK, Carney E, Angelo RT. Determining ecoregional reference conditions for nutrients, secchi depth and chlorophyll a in Kansas Lakes and Reservoirs. *Lake and Reservoir Management*, 2006, 22(2):151-159.
- [11] Braak CJF, Juggins S. Weighted averaging partial least squares regression(WA-PLS): an improved method for reconstructing environmental variables from species assemblages. *Hydrobiologia*, 1993,269/270(1):485-502.
- [12] 孟 伟,刘征涛,张 楠等.流域水质目标管理技术研究(Ⅱ)——水环境基准、标准与总量控制.环境科学研究,2008,21(1):1-7.
- [13] 郑丙辉,许秋瑾,周保华等.水体营养物及其响应指标基准制定过程中建立参照状态的方法——以典型浅水湖泊太湖为例.湖泊科学,2009,21(1):21-26.
- [14] Ryder RA, Kerr SR, Loftus KH *et al.* The morphoedaphic index, a fish yield estimator: review and evaluation. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1974, 31(5):663-688.
- [15] Vighi M, Chiaudani G. A simple method to estimate lake phosphorus concentrations resulting from natural, background, loadings. *Water Research*,1985,19(8):987-991.
- [16] Cardoso AC, Solimini A, Premazzi G *et al.* Phosphorus reference concentrations in European lakes. *Hydrobiologia*, 2007, 584:3-12.
- [17] 万成炎,吴晓辉,朱爱民等.江苏省大中型水库水质的理化特性及其渔业评价.水利渔业,2003,23(1):43-45.
- [18] 万成炎.江苏省水库渔业资源现状及合理利用对策[学位论文].武汉:华中农业大学,2003.
- [19] 黄漪平.太湖水环境及其污染控制.北京:科学出版社,2001:298.
- [20] 董旭辉,羊向东,刘恩峰.湖北太白湖 400 多年来沉积硅藻记录及湖水总磷的定量重建.湖泊科学,2006,18(6):597-604.
- [21] 董旭辉,羊向东,王 荣等.长江中下游地区湖泊硅藻-总磷转换函数.湖泊科学,2006,18(1):1-12.
- [22] 董旭辉,羊向东,潘红玺.长江中下游地区湖泊现代沉积硅藻分布基本特征.湖泊科学,2004,16(4):298-304.
- [23] 郑丙辉,许秋瑾,朱延忠.湖泊营养盐控制标准制订方法的初步研究.环境科学,2009,30(9):2497-2501.