

DOI: 10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 01. 004

基于非参数回归改进的太湖总磷压力-响应模型

华祖林^{1,2,3}, 韩爱秋^{1,2,3}

(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, 江苏 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, 江苏 南京 210098;

3. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对现有压力-响应模型存在的不足,以非参数 LOWESS 稳健回归改进湖泊压力-响应模型,构建了太湖 TP 与 Chl-a 的非参数 LOWESS 稳健回归压力-响应模型,推断出太湖 TP 参照状态质量浓度为 0.018 mg/L;通过自助法得出其 95% 置信区间为 0.013 ~ 0.030 mg/L,同时从多角度验证了结果的合理性。

关键词:湖泊参照状态;压力-响应模型;LOWESS 稳健回归;自助法;总磷;太湖

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933 (2019)01 - 0020 - 05

Improved stressor-response model of total phosphorus in Taihu Lake based on nonparametric regression // HUA Zulin^{1,2,3}, HAN Aiqiu^{1,2,3} (1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lake of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In view of the shortages existing in the present stressor-response model, the stressor-response model of lake was improved by nonparametric LOWESS robust regression. Taking Taihu Lake as a case, a nonparametric LOWESS robust regression stressor-response model of total phosphorus and chlorophyll a was constructed. The reference condition concentration of total phosphorus in Taihu Lake was deduced as 0.018 mg/l, and the 95% confidence interval was 0.013-0.030mg/l by bootstrap method. The rationality of the result is verified from multi angle.

Key words: reference condition of lake; stressor-response model; LOWESS robust regression; bootstrap method; total phosphorus; Taihu Lake

湖泊参照状态指湖泊受到人类活动影响最小或环境系统可达到的最佳状态^[1],它是制定水质标准的科学依据,也是评估、预防、控制和管理湖泊富营养化的基础,更是水污染治理和生态修复期望达到的“终极”状态。压力-响应模型是最适用于确定浅水湖泊参照状态的模型之一。Lamon 等^[2]探索性地以贝叶斯多层次线性回归模型确立了美国不同类型湖泊压力变量和响应变量的响应关系;US EPA^[3]介绍了利用线性回归、多元线性回归和非参数拐点分析等建立压力-响应模型的方法;Haggard 等^[4]利用线性回归和分类回归树相结合的方法确定了美国红河流域的营养物基准值;Qian 等^[5]构建了连续变量贝叶斯网络建模框架,该框架结合了贝叶斯网络模

型和传统经验统计模型,并确定了美国俄亥俄州溪流营养物基准值;在中东部平原湖泊生态区、云贵高原湖泊生态区等 8 个湖泊营养物一级生态区的基础上^[6-7],Huo 等^[8-11]引入压力-响应模型来制订中国受人类活动影响较严重湖泊的参照状态,利用线性回归压力-响应模型制订了东部平原湖泊生态区和云贵湖泊生态区的营养物基准,并在考虑季节影响水质的情况下采用分类回归树与拐点分析相结合的方法建立压力-响应模型深入研究湖泊生态分区参照状态的确定;吴超等^[12]采用分类回归树和线性回归分别建立了压力-响应模型,并通过相互验证确定了太湖 TN、TP 等的参照状态;张亚丽等^[13]利用贝叶斯拐点分析等 3 种非线性方法确定了中国 9 个

基金项目:国家自然科学基金(51739002,51379060)

作者简介:华祖林(1965—),男,教授,博士,主要从事水环境模拟与水环境修复研究。E-mail: zulinhua@hhu.edu.cn

典型湖泊的参照状态;霍守亮等^[14-15]利用分类回归树、拐点分析法、贝叶斯层次线性回归建立了压力-响应模型,针对不同湖泊生态分区进行参照状态的确定和案例研究,并进行了归纳总结。

以上研究成果有值得商榷和改进之处,如线性回归模型要求响应关系是线性的、因变量的误差呈正态分布、采集的数据样本独立等,而实际上,光照、水深等环境因素会影响变量间的响应关系,导致其难以呈现出线性;此外,湖泊实际监测数据来源复杂,且为时间序列,很难满足线性回归分析设定的正态性和独立性等假设理论。贝叶斯层次回归模型虽然能有效缓解数据测量误差的问题,但需要在调查时以明显分层的方式采集原始数据,以便分层建立模型。分类回归树压力-响应模型适用于识别对模型结果变化有显著贡献的压力变量,但在数据量较少时缺乏稳健性,压力变量很小的变化可能引起模型结果较大的变化,使结果的准确性得不到保障;拐点分析法需要进一步研究低于营养物拐点对应的响应变量数值是否能够支持水体的指定用途^[14-15]。这些限制性条件会导致推断的参照状态浓度过高或过低。压力-响应模型方法的改进一直是学者们孜孜不倦探索的课题。

本文针对原有压力-响应模型需要满足设定条件等特点,考虑到响应关系应是非线性的,以及异常点会降低模型稳健性等情况,尝试性地采用非参数 LOWESS 稳健回归来改进浅水湖泊的压力-响应模型。改进模型能消除异常点对估计结果的影响,对于非线性、非齐次问题有较好的效果。太湖作为东部平原湖泊生态区浅水湖泊的典型代表,参照状态的确定尤为重要^[16-17],以太湖为研究对象进行湖泊参照状态的确定计算。

1 非参数 LOWESS 稳健回归模型的构建

非参数 LOWESS 稳健回归是拟合难以用具体

函数描述响应关系数据的有效方法,其基本思想是先用局部多项式进行拟合,然后定义稳健的权数并进行光滑处理,重复运算数次后就可以得到自变量与因变量稳健的拟合曲线^[18]。具体步骤如下:

步骤 1:将压力变量 TP 和响应变量 Chl-a 关系曲线表示为 $m(x)$,利用局部多项式进行拟合,得到拟合值 $\hat{m}(x_i)$:

$$\hat{m}(x_i) = \sum_{j=0}^d \hat{\beta}(x_i) x_i^j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: x_i 为 TP 的观测值, mg/L; $\hat{\beta}(x_i)$ 为对局部参数 $\beta(x_i)$ 的最小二乘加权回归。

步骤 2:定义并计算稳健权数 δ_k :

$$\delta_k = \frac{B e_k}{6s} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

其中 $e_k = m(x_k) - \hat{m}(x_k)$
式中: B 为二次核函数,定义为 $B(x) = (1 - x^2)^2 I(I$ 为符号函数,当 $|x| < 1$ 时 $I = 1$;当 $|x| \geq 1$ 时 $I = 0$); e_k 为残差; x_k 为加权的 x_i ; s 为残差绝对值的中位数, $s = \text{median}(|e_1|, |e_2|, \dots, |e_n|)$ 。

步骤 3:利用 $\delta_k w_k(x_i)$ 对 $m(x)$ 进行局部加权最小二乘估计,得到新的模型残差 e_k 。其中

$$w_k(x_i) = W(h_i^{-1}(x_k - x_i)) \quad (3)$$

式中: W 为距离核函数; h_i 为光滑参数, $h_i = |x_i - x_j|$, $x_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 为 x_i 相邻的 TP 观测值, h_i 为计算得出的 r 个数中最小的一个。

步骤 4:重复第 2 步和第 3 步,最后第 N 次迭代得到的拟合值产生 TP 和 Chl-a 的响应关系曲线。

稳健权数可将异常值排除在外,并且初始残差大(小)的观测值在下次加权最小二乘法中的权数就小(大),重复几次后就可把异常值不断地排除在外,最终得到稳健的响应关系曲线。Cleveland^[18]推荐迭代次数 $N = 3$ 。

非参数 LOWESS 稳健回归压力-响应模型构建

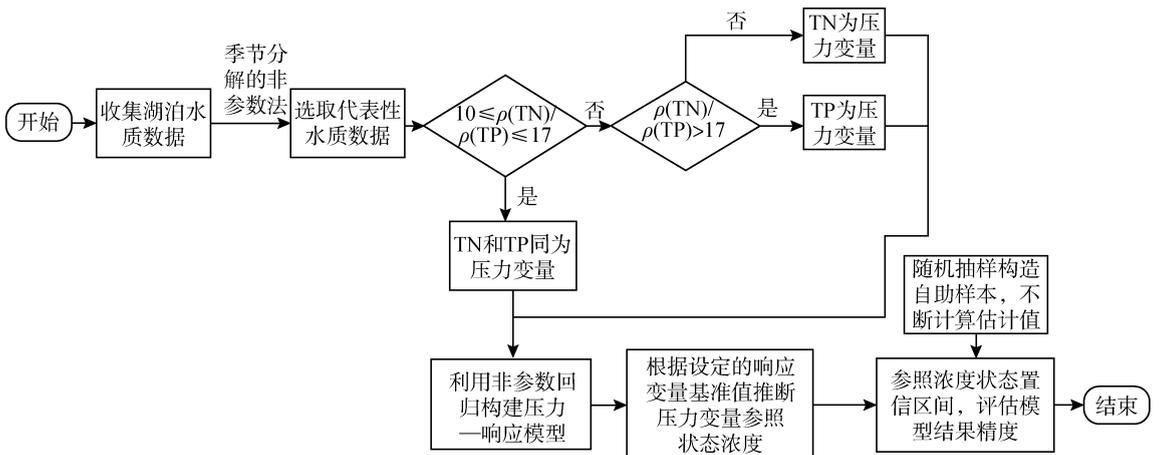


图 1 压力-响应模型构建流程

2 模型数据与压力变量的确定

2.1 模型数据

利用 LOWESS 稳健回归方法建立压力-响应模型推断太湖参照状态,数据来源于文献^[19]。文献^[19]记录了图 2 太湖湖泊生态系统国家野外科学观测研究站(简称太湖站)全太湖 32 个野外站点中 8 个站点自 1991—2006 年的逐月观测数据。考虑到参照状态是受人类活动影响最小或环境系统可达到的最佳状态,所以本文采用位于湖心区域受人类活动影响相对较小的 7 号和 8 号站点的数据。华祖林等^[20]采用季节分解的非参数法发现 1999—2001 年太湖湖心区域的 TP 与 Chl-a 的观测值比 1995—2006 年的观测值更适合用于推断太湖的参照状态。本文使用 7、8 号站点 1999—2001 年共 3 年 108 个观测值进行分析。

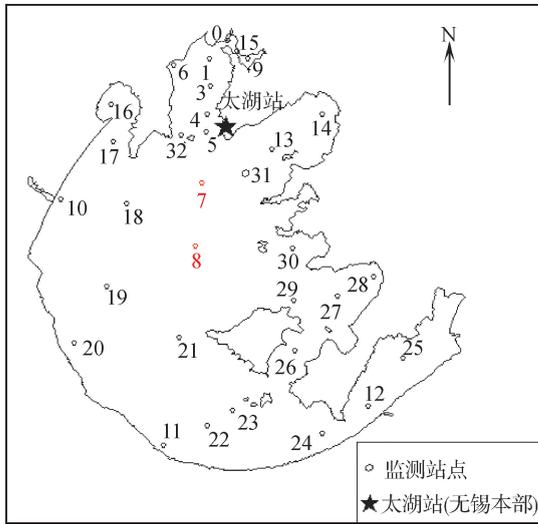


图 2 太湖站监测点图

2.2 压力变量确定和数据处理

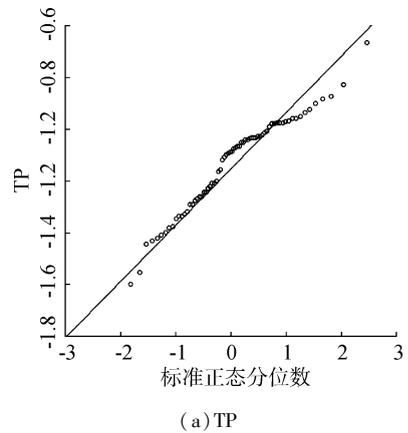
首先对模型数据进行分析。1999—2001 年,太湖湖心 TN、TP 以及 Chl-a 质量浓度平均值、中位数、均方差等见表 1。1999—2001 年太湖湖心观测值稳定性按从大到小顺序为 TP、TN、Chl-a。在峰度和偏度检验中,TN、TP 和 Chl-a 均存在正偏态现象,偏重程度按从大到小顺序为 Chl-a、TN、TP,且三者均偏离正态分布。综合考虑数据稳定性及峰度和偏度检验结果,在选择压力变量时应优先考虑 TP。

表 1 1999—2001 年 TN、TP 与 Chl-a 统计特征比较

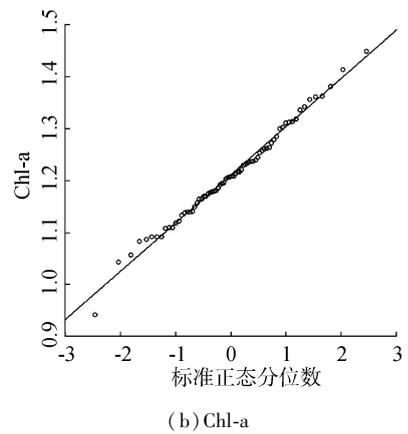
统计值	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Chl-a})/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	统计值	TN	TP	Chl-a
最小值	0.70	0.01	2.61	均方差	0.62	0.03	5.73
中位数	1.59	0.07	6.70	峰度	-0.67	-0.33	0.67
平均值	1.69	0.08	8.71	偏度	0.44	0.28	1.19
最大值	3.15	0.16	25.95				

在研究湖泊氮磷与 Chl-a 关系时,TN 与 TP 质量浓度比值($\rho(\text{TN})/\rho(\text{TP})$)是一个关键参数,常根据 $\rho(\text{TN})/\rho(\text{TP})$ 判别藻类受营养盐限制的类型。 $\rho(\text{TN})/\rho(\text{TP})$ 比较大 (> 17) 时藻类受磷限制, $\rho(\text{TN})/\rho(\text{TP})$ 比较小 (< 10) 时藻类受氮限制, $\rho(\text{TN})/\rho(\text{TP})$ 中等 ($10 \sim 17$) 时藻类受二者共同限制。表 1 显示太湖 1999—2001 年 TN 质量浓度平均值为 1.69 mg/L ,TP 质量浓度平均值为 0.08 mg/L , $\rho(\text{TN})/\rho(\text{TP}) = 21.12$,大于 17。可见,1999—2001 年太湖为磷限制型湖泊。张波等^[21]研究表明,太湖水体存在一定的固氮作用,固氮速率为每小时 1.53 ng/L ,导致水体中 TN 与 Chl-a 响应关系不明显。因此分析太湖 TP 和 Chl-a 的响应关系更符合压力-响应模型的释义。

由于原始逐月观测数据 TP 与 Chl-a 存在数量级差别,因此需要对原始数据进行处理。本文采用 Qian^[22]提出的幂变换对 TP 和 Chl-a 数据进行处理。图 3 是 TP 数据经过对数变换后和 Chl-a 0.1 次变化后的 Q-Q 图。从图 3 可以明显地看出,TP 数据



(a) TP



(b) Chl-a

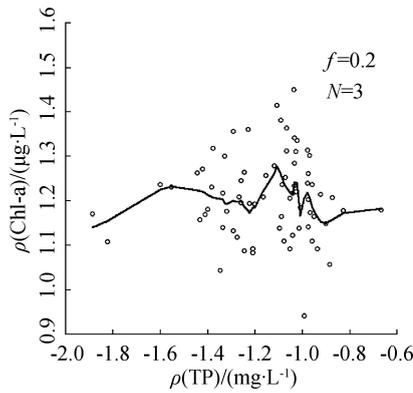
图 3 TP 与 Chl-a 幂变换数据 Q-Q 图

点与标准正态分布直线拟合效果较差,存在严重的偏离。结合表 1 峰度和偏度检验结果,说明 1999—2001 年太湖湖心 TP 观测数据和幂变换后均不满足正态性假设,所以基于上述假设建立的压力-响应模型具有不合理性,进一步说明建立非参数方法压力-响应模型的必要性。

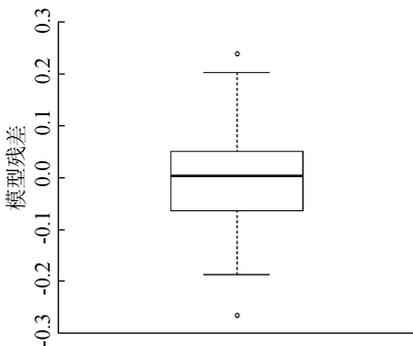
在采用压力-响应模型推断参照状态时,需要给定一个响应变量基准值。在保证水体使用功能的前提下推断营养物基准时,Chl-a 是联系营养物浓度的重要响应变量^[8]。参考 USEPA^[23] 和霍守亮等^[14,24-25]对 Chl-a 基准值的研究,本文在建立压力-响应模型时设定 4.73 $\mu\text{g/L}$ Chl-a 为太湖响应变量基准值。

3 模型验证

采用 LOWESS 稳健回归建立 1999—2001 年太湖湖心区域 TP 与 Chl-a 的压力-响应模型,平滑参数 $f = 0.2$,迭代次数 $N = 3$ 。图 4 为太湖湖心区域 1999—2001 年 Chl-a 与 TP 压力-响应模型及模型残差。从图 4 的散点可以看出,Chl-a 与 TP 并不呈现出简单的线性响应关系,而是复杂的非线性响应关系。根据确定的响应变量 Chl-a 基准值 4.73 $\mu\text{g/L}$,可以得出压力变量 TP 的参照状态质量浓度为 0.018 mg/L。此外,结合置信区间和模型残差评估模型结果的准确性,利用自助法求得 1999—2001 年



(a) 模型



(b) 残差盒式图

图 4 TP 与 Chl-a 压力-响应模型及模型残差

太湖 TP 参照状态质量浓度的 95% 置信区间为 0.013 ~ 0.030 mg/L。从图 4(b) 可以看出,模型残差均值为 0.0 mg/L 左右,下 25% 分位点为 -0.06 mg/L,上 25% 分位点为 0.04 mg/L,说明 LOWESS 稳健回归方法可用于建立压力-响应模型进行参照状态的推断。

表 2 显示的是不同地区 TP 参照状态质量浓度。郑丙辉等^[26]应用频率分析法建立了太湖 TP 参照状态,并结合时间参照状态法和沉积物反演法进行验证,综合分析得出 TP 参照状态为 0.03 mg/L;华祖林等^[20]利用 1999—2001 年 TP 数据 5% 分位点的值作为太湖参照状态质量浓度,其结果为 0.03 mg/L,并利用几何分布分块自助法确定其 95% 置信区间为 0.025 ~ 0.046 mg/L。采用频率分析法在确立湖泊参照状态时需要确定频率分布分位点,通常都是选择上(下)25% 或 5%,由于 25% 或 5% 是人为确定的,因而结果受到人为影响大。吴超等^[12]利用分类回归树和线性回归法建立的压力-响应模型相互验证,确定太湖流域 TP 质量浓度基准值为 0.67 mg/L。

表 2 不同地区 TP 参照状态浓度

地区	TP 参照状态质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	方法	文献
太湖	0.030	频率分步法	[20,26]
太湖	0.067	线性回归和拐点分析 压力-响应模型	[12]
太湖	0.018	改进的 MEI 模型	[27]
太湖	0.01 ~ 0.05	综合调查	[28]
中东部湖泊生态区	0.022 ± 0.007	线性回归压力-响应模型	[14]
不同湖泊生态分区	0.015 ~ 0.222	非参数拐点分析和 贝叶斯拐点分析	[14]

霍守亮等^[14]利用非参数拐点分析和贝叶斯拐点分析,得到不同湖泊生态区压力变量 TP 突变点的质量浓度范围为 0.015 ~ 0.222 mg/L,利用简单线性回归模型得到中东部湖泊生态分区 TP 参照状态质量浓度范围为 (0.022 ± 0.007) mg/L;顾莉等^[27]将 1960 年总碱度实测值代入其建立的改进 MEI 模型得到太湖 TP 质量浓度为 0.018 mg/L。在 20 世纪 60 年代对太湖的调查研究表明,太湖 TP 质量浓度为 0.01 ~ 0.05 mg/L^[28]。太湖蓝藻暴发最近 30 年才出现,60 年代太湖的状态应该比较接近其历史上受人类活动影响较小时的情况。本文采用季节分解的非参数局部线性回归模型推断得出更适合建立太湖参照状态的数据,而且非参数 LOWESS 稳健回归不需要设定分位点,计算过程受人为影响小,计算得到的太湖 TP 参照状态质量浓度为 0.018 mg/L,在线性回归和拐点方法得出的参照状态质量浓度范围内。因此,本文得到的结果可以作为太湖参照状态

质量浓度,并且是可信的。

4 结 语

以季节分解的非参数方法验证的适合推断太湖参照状态的数据为基础,结合峰度和偏度检验,并考虑湖泊营养盐的限制问题,以 TP 作为压力变量,构建了稳健性高、对非线性问题适应性强的 LOWESS 稳健回归的湖泊压力-响应模型。根据设定的 Chl-a 推断 TP 的参照状态质量浓度为 0.018 mg/L;通过自助法得出其 95% 置信区间为 0.013 ~ 0.030 mg/L,同时从多角度对所建模型进行了验证,表明结果较为合理可信。

参考文献:

[1] US Environmental Protection Agency. Ambient water quality criteria recommendations: information supporting the development of state and Tribal nutrient criteria, lakes and reservoirs in nutrient ecoregion II (EPA-822-B-00-007) [R]. Washington D C: US Environmental Protection Agency, 2000; 6-30.

[2] LAMON E C, QIAN S S. Regional scale stressor-response models in aquatic ecosystem [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008, 44: 771-781.

[3] US Environmental Protection Agency. Using stressor-response relationships to derive numeric nutrient criteria [R]. Washington D C: US Environmental Protection Agency, 2010.

[4] HAGGARD B E, SCOTT J T, LONGING S D. Sestonic chlorophyll-a shows hierarchical structure and thresholds with nutrients across the Red River Basin, USA [J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42: 437- 445.

[5] QIAN S S, MILTNER R J. A continuous variable Bayesian networks model for water quality modeling: a case study of setting nitrogen criterion for small rivers and streams in Ohio, USA [J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 69: 14-22.

[6] 姜甜甜. 我国湖泊生态分区技术及应用研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2014.

[7] HUO Shouliang, MA Chunzi, XI Beidou, et al. Lake ecoregion and nutrient criteria development in China [J]. Ecological Indicators, 2014, 46: 1-10.

[8] HUO Shouliang, XI Beidou, MA Chunzi, et al. Stress-response models: a practical application for the development of lake nutrient criteria in China [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47: 11922-11923.

[9] ZHANG Yali, HUO Shouliang, MA Chunzi, et al. Using stressor-response models to derive numeric nutrient criteria for lakes in the Eastern Plain Ecoregion, China [J]. CLEAN-Soil, Air, Water, 2014, 42(11): 1509-1517.

[10] HUO Shouliang, MA Chunzi, XI Beidou, et al. Determining ecoregional numeric nutrient criteria by stressor-response models in Yungui ecoregion lakes, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21: 8831-8846.

[11] HUO Shouliang, MA Chunzi, XI Beidou, et al. Nonparametric approaches for estimating regional lake nutrient thresholds [J]. Ecological Indicators, 2015, 58: 225-234.

[12] 吴超, 胡友彪, 苏婧, 等. 基于压力响应关系法的湖泊营养物基准制定 [J]. 环境工程学报, 2015, 9(6): 2631-2638. (WU Chao, HU Youbiao, SU Jing, et al. Using stressor-response analysis to derive nutrient criteria for lakes [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(6): 2631-2638. (in Chinese))

[13] ZHANG Yali, HUO Shouliang, XI Beidou, et al. Establishing nutrient criteria in nine typical lakes, China: a conceptual model [J]. CLEAN- Soil, Air, Water, 2016, 44(10): 1335-1344.

[14] 霍守亮, 席北斗. 湖泊营养物基准制定的压力-响应模型及案例研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.

[15] 霍守亮, 马春子, 席北斗, 等. 湖泊营养物基准研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2017, 7(2): 125-133. (HUO Shouliang, MA Chunzi, XI Beidou, et al. Progress in research on lake nutrient criteria [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2017, 7(2): 125-133. (in Chinese))

[16] 张洪举, 甘升伟, 袁洪州, 等. 环太湖河流入湖水质控制浓度分析 [J]. 水资源保护, 2012, 28(6): 8-11. (ZHANG Hongju, GAN Shengwei, YUAN Hongzhou, et al. Analysis of controlled concentration of water quality of rivers around Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(6): 8-11. (in Chinese))

[17] 陆桂华, 张建华. 太湖水环境综合治理的现状、问题及对策 [J]. 水资源保护, 2014, 28(2): 67-69. (LU Guihua, ZHANG Jianhua. Present status and problems of comprehensive treatment of water environment in Taihu Lake and countermeasures [J]. Water Resources Protection, 2014, 28(2): 67-69. (in Chinese))

[18] CLEVELAND W S. Robust locally weighted regression and smoothing scatter plots [J]. Journal of the American Statistical Association, 1979, 74: 829-836.

[19] 秦伯强, 胡春华. 中国生态系统定位观测与研究数据集: 湖泊湿地海湾生态系统卷 江苏太湖站 (1991—2006) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.

[20] 汪靛, 华祖林, 顾莉, 等. 中国东部浅水湖泊参照状态确定的非参数方法 [J]. 水科学进展, 2014(5): 724-730. (WANG Liang, HUA Zulin, GU Li, et al. Nonparametric method for determining the reference condition of shallow lakes in eastern China [J]. Advances in Water Science. 2014(5): 724-730. (in Chinese))

(下转第 46 页)

- [2] 陈婧. 推动“河长制”需完善监督考核机制[N]. 中国经济时报, 2017-08-07(2).
- [3] 柳秋良. 以量化考核推动河长制落实[N]. 中国环境报, 2017-09-19(3).
- [4] 左佳. 落实河长制 关键在考核[N]. 中国环境报, 2017-06-01(3).
- [5] 刘长兴. 广东省河长制的实践经验与法制思考[J]. 环境保护, 2017, 45(9): 34-37. (LIU Changxing. Thinking on the practical experience and legislation of the river governor system in Guangdong Province [J]. Environmental Protection, 2017, 45(9): 34-37. (in Chinese))
- [6] 朱玫. 论河长制的发展实践与推进[J]. 环境保护, 2017, 45(增刊1): 58-61. (ZHU Mei. On the development and promotion of river governor system[J]. Environmental Protection, 2017, 45(Sup1): 58-61. (in Chinese))
- [7] 黄显峰, 刘展志, 方国华. 基于云模型的水利现代化评价方法与应用[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(6): 54-61. (HUANG Xianfeng, LIU Zhanzhi, FANG Guohua. Evaluation and application of water conservancy modernization index system based on a cloud model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(6): 54-61. (in Chinese))
- [8] 郑斌, 唐德善, 史兹国. 基于综合集成赋权法的河道整治方案优选研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(4): 113-115. (ZHENG Bin, TANG Deshan, SHI Ziguo. Scheme optimization of river regulation based on combination weighting method[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(4): 113-115. (in Chinese))
- [9] 王惠子, 赵敏. 基于综合集成赋权的水务公司财务评价[J]. 水利经济, 2014, 32(4): 21-24. (WANG Hui zi, ZHAO Min. Financial evaluation of water affair companies based on integrated weighting method [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2014, 32(4): 21-24. (in Chinese))
- [10] 乔丹颖, 刘凌, 闫峰. 基于云模型的中运河水安全评价[J]. 水资源保护, 2015, 31(2): 26-29. (QIAO Danying, LIU Ling, YAN Feng. Assessment on water security of Zhong Canal based on cloud model[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(2): 26-29. (in Chinese))
- [11] 耿芳, 董增川, 徐伟. 基于云模型的黑龙江上中游河流健康评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 131-135. (GENG Fang, DONG Zengchuan, XU Wei. River health assessment of upper and middle reaches of Heilongjiang River based on cloud model [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 131-135. (in Chinese))
- [12] 陈耀辉, 孙春燕. 对最大隶属原则有效度的进一步研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2002, 19(1): 47-49. (CHEN Yaohui, SUN Chunyan. Further study of validity for the maximum subordination principle [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition), 2002, 19(1): 47-49. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-01-11 编辑: 熊水斌)

(上接第 24 页)

- [21] 张波, 张路. 太湖水体固氮速率时空变化[J]. 环境科学学报, 2016, 36(4): 1129-1136. (ZHANG Bo, ZHANG Lu. Spatial-seasonal variations of nitrogen fixation of water column in Taihu Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(4): 1129-1136. (in Chinese))
- [22] QIAN Song. 环境与生态统计: R 语言的应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [23] 郭茹, 杨京平, 梁新强, 等. 太湖苕溪流域氮磷的生物学阈值评估[J]. 环境科学学报, 2013, 33(10): 2756-2765. (GUO Ru, YANG Jingping, LIANG Xinqiang, et al. Biological threshold of nitrogen and phosphorus in Tiaoxi River, Taihu Lake Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(10): 2756-2765. (in Chinese))
- [24] HUO Shouliang, ZAN Fengyu, CHEN Qi, et al. Determining reference conditions for nutrients, chlorophyll-a and Secchi depth in Yungui Plateau ecoregion lakes, China [J]. Water and Environment Journal, 2012, 26: 324-334.
- [25] HUO Shouliang, XI Beidou, SU Jing, et al. Determining reference conditions for TN, TP, SD and Chl-a in eastern plain ecoregion lakes, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(5): 1001-1006.
- [26] 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 [J]. 湖泊科学, 2009, 21(1): 21-26. (ZHENG Binghui, XU Qiujin, ZHOU Baohua, et al. Building nutrient and its response indications reference state for criteria enactment: on the case of Lake Taihu, a typical shallow lake in eastern China [J]. Journal of Lake Science, 2009, 21(1): 21-26. (in Chinese))
- [27] 顾莉, 李秋兰, 华祖林, 等. 确定太湖流域湖库总磷参照浓度的改进 MEI 模型 [J]. 湖泊科学, 2013, 25(3): 347-351. (GU Li, LI Qiulan, HUA Zulin, et al. The improved MEI model for forecasting TP reference condition in Lake Taihu basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(3): 347-351. (in Chinese))
- [28] 中国科学院南京地理研究所. 太湖综合调查初步报告 [M]. 北京: 科学出版社, 1965.

(收稿日期: 2018-04-28 编辑: 彭桃英)