

平原河网水体富营养化评价

李晓鹏¹, 陈勇民^{2*}

¹杭州铁路设计院有限责任公司, 浙江 杭州

²浙江科技学院建筑工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年2月9日; 录用日期: 2023年3月23日; 发布日期: 2023年4月23日

摘要

根据实用性和适用性原则, 选择对数型幂函数普适指数公式, 分析和评价平原河网地区水体的富营养化状态。选取溶解氧、叶绿素a、总磷、总氮、高锰酸盐指数、氨氮、硝酸盐氮七项指标作为富营养化的评价因子。设定各指标的“极贫”营养值作为“参照值”, 通过“规范转换式”将所有水质指标实测值转换成“规范值”, 利用对数型幂函数普适指数公式将“规范值”综合计算成营养状态综合指数, 对水体富营养化状态进行评价。结果表明: 对数型幂函数普适指数公式适合于评价平原河网水体的富营养化状态; 平原河网水体普遍处于富营养甚至重富营养状态, 其富营养状况与季节存在关联性; 氮和磷是影响水体富营养化状态的主要因素, 磷的影响最大。

关键词

平原河网, 富营养化, 指数公式, 综合评价

Eutrophication Evaluation of Water in the Plain River Network

Xiaopeng Li¹, Yongmin Chen^{2*}

¹Hangzhou Railway Design Institute Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

²School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou Zhejiang

Received: Feb. 9th, 2023; accepted: Mar. 23rd, 2023; published: Apr. 23rd, 2023

Abstract

According to the principle of practicality and applicability, the universal exponential formula of logarithmic power function is chosen to analyze and evaluate the eutrophication status of water in the plain

作者简介: 李晓鹏, 男, 籍贯重庆, 1984年9月出生, 研究生, 高级工程师, 研究方向为给水排水理论与工程。Email: 247272105@qq.com
*通讯作者 Email: cym310@zust.edu.cn

文章引用: 李晓鹏, 陈勇民. 平原河网水体富营养化评价[J]. 水资源研究, 2023, 12(2): 198-205.

DOI: 10.12677/jwrr.2023.122023

river network area. Seven indicators, namely dissolved oxygen, chlorophyll a, total phosphorus, total nitrogen, permanganate index, ammonia nitrogen and nitrate nitrogen, were selected as evaluation factors for eutrophication evaluation. After setting “very poor” nutritional values for each indicator as “reference values”, all water quality indicators measured values are converted into “normative values” by “normative values conversion formula”. The “normative values” are integrated into a comprehensive index of nutrient status using the universal exponential formula of logarithmic power function to evaluate the eutrophication status of water bodies. The results show that the universal exponential formula of logarithmic power function is suitable for evaluating the eutrophication status of water in the plain river network. The plain river network water is generally in eutrophic or even heavy eutrophic state, and their eutrophic status is correlated with seasons. Nitrogen and phosphorus are the main factors affecting the eutrophication status of water, while phosphorus has the greatest influence.

Keywords

Plain River Network, Eutrophication, Exponential Formula, Comprehensive Evaluation

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

我国平原河网地区的水环境特点主要包括：河道纵横交错，河湖相串；污染源含点源和面源排放，且排放非恒定；水体受到不同程度污染，富营养化趋势明显；水质变量为多组分，影响因素为多参数[1] [2]。平原河网地区河道水体中含有较高的氮、磷物质，易使水体向富营养化方向进化，从而导致水体透明度降低，积聚有毒有害物质，使得整个水体生态系统失去平衡，同时水功能受到严重阻碍和破坏[3] [4] [5]。富营养化会改变水体的物理化学性质，富营养化水体中的藻类还会产生藻毒素，可使鱼卵变异、水生植物死亡、鱼类行为及生长异常，还可能进入食物链，严重影响人体健康[6] [7] [8]。天然和人为因素都可能导致水体富营养化[9]。本研究选取浙江省东部平原河网地带某旅游度假区河道进行了长期水质监测，根据监测指标对水体的富营养化状态进行分析和评价。该河道全长约 4000 m，河道平均宽约 30 m，河道区域地形及采样点(A 点，B 点，C 点)分布如图 1 所示。



Figure 1. Diagram of river topography and sampling point distribution

图 1. 河道地形和采样点分布图

2. 研究方法

2.1. 富营养化评价方法

富营养化评价有多种方法,使用范围不同,优缺点各异。国内外常用的水体富营养化评价方法有特征法、生物指标法、营养状态指数法和参数法等[10][11][12][13]。

特征法以生态环境因子特征评价水体营养状态。采用湖盆形态、水质、生物和底质 4 个指标,定性地将水体划分为贫营养型和富营养型。

生物指标评价法可分为优势种评价法和生物多样性指数评价法。以金藻、硅藻和绿藻为主的浮游植物分别对应着贫营养型、中营养型和富营养型水体。该评价法根据水生生物的调查资料,通过藻类多样性指数来确定水体富营养化状况。

营养状态法以多项代表性指标综合计算评价指数,对水体营养状态进行分级评价。

参数法是以水体富营养化的主要代表性参数对水体营养状态进行评价。一般选择总磷、总氮、叶绿素 a、溶解氧及透明度等作为代表性评价参数,通过将这些参数排序并分级,水体营养程度可划分为贫、中、中-富、富、极富等不同等级。代表性参数中,总磷以及叶绿素的参数值一般要选择水体夏季值或者各参数在明显相关时期的值[14][15][16]。

2.2. 对数型幂函数普适指数公式

由于特征法偏向于简单的定性评价,生物指标法偏向于水体中藻类类型进行定性评价,营养状态法受测试技术误差和季节因素影响较大,不适用于平原河网的富营养化评价。一般的参数法虽然选择了主要代表性参数来评价水体富营养状态,但由于各水质指标的量纲和单位并不完全相同,致使各参数值相差很大,有的甚至相差几个数量级。此外,各水质指标如果不进行适当处理,则其对富营养化评价结果的影响程度和灵敏度各不相同,难以协调。因此,需要选择一种适用于本研究的富营养化评价方法。

本研究监测河道在选择富营养化评价方法时考虑到以下原则:

- 1) 实用性:评价方法需要考虑评价水体的实际情况,能够更加客观地反应水体富营养化状况;
- 2) 适应性:根据方法的适用条件和本研究的实际情况选取评价方法,使得评价结果尽量准确。

富营养化评价方法和涉及到的水质指标都很多,本研究监测的与富营养化相关的核心指标有溶解氧(DO)、叶绿素 a (Chl.a)、氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)、总磷(TP)等。根据上述原则,选择对数型幂函数普适指数公式对平原河网监测河道进行富营养化评价。

李祚泳提出了对数型幂函数普适指数公式,并利用粒子群算法优化确定公式参数值,使得公式具有普遍适用性[17]。该公式目前在湖泊、水库和河流的富营养化综合评价中得到广泛应用。相较于其他评价方法,对数型幂函数普适指数公式具有以下优势:1) 该公式共同适用于 14 项水质指标,在评价过程中各指标通过“规范变换式”将实测值转换为“规范值”,使得各指标在计算过程中“等效”,计算简便且普适性高;2) 根据“等差赋值”计算得到各级参照标准中的指数目标值,在一定变化范围内分辨精度相同;3) 该公式对采用的 14 项评价因子“等效”,综合评价时各个指标权重相同,评价结果更具客观性。

在处理评价数值时,因各个评价指标的单位或量纲并不完全相同,使得计算出来的不同指标的同级标准值差异较大,甚至达到几个数量级。针对此情况,需先对各指标实测值进行预处理。对各指标设定一个“参照值” x_{i0} ,然后构造一个“规范转换式”计算出各指标的“规范值” s_i 。其中,选取 x_{i0} 时要使各指标的“规范转换式”计算得到的同一级标准的不同指标的“规范值” s_{ik} (i 为指标, k 为级别)相差不大,最好不超过 1 个数量级。平原河网水体富营养化评价中选择各指标的“极贫”营养值作为“参照值” x_{i0} 。

各指标的“规范转换式”如式(1)和式(2)所示。

$$s_i = \begin{cases} \frac{x_{i0}}{x_i} & x_i \leq x_{i0} \text{ 对指标SD} \\ \left(\frac{x_{i0}}{x_i}\right)^2 & x_i \leq x_{i0} \text{ 对指标DO} \\ \left(\frac{x_i}{x_{i0}}\right)^3 & x_i \geq x_{i0} \text{ 对指标ppro} \\ \frac{x_i}{x_{i0}} & x_i \geq x_{i0} \text{ 对其余11项指标} \end{cases} \quad (1)$$

$$s_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_{i0} \text{ 对DO和SD} \\ 1 & x_i < x_{i0} \text{ 对ppro和其余11项指标} \end{cases} \quad (2)$$

式中: s_i 为指标 i 的规范值, x_i 为指标 i 的实测值, x_{i0} 为指标 i 的参照值, SD 为透明度(m), DO 为溶解氧(mg/L), ppro 为初级生产力(g/m²·d)。

由式(1)和式(2)计算出的各指标的各级标准的“规范值” s_{ik} 以及分级标准如表 1 和表 2 所示。

Table 1. Reference, standard and normative values (1)

表 1. 参照值、标准值及规范值(1)

状态	Chl.a (ug/L)		TP (ug/L)		TN (mg/L)		COD _{Mn} (mg/L)		BOD ₅ (mg/L)		NH ₃ -N (mg/L)		BIO 生物量(10 ⁴ 个/L)	
	x_{ik}	s_{ik}	x_{ik}	s_{ik}	x_{ik}	s_{ik}	x_{ik}	s_{ik}	x_{ik}	s_{ik}	x_{ik}	s_{ik}	x_{ik}	s_{ik}
极贫	0.40	1	1.0	1	0.02	1	0.12	1	0.1	1	0.01	1	2.0	1
贫	1.60	4	4.6	4.6	0.08	4	0.48	4	1.2	12	0.055	5.5	20	10
中	10	25	23.0	23	0.31	15.5	1.80	15	2.8	28	0.20	20	60	30
富	64	160	110	110	1.20	60	7.10	59.17	6.6	66	0.65	65	200	100
重富	160	400	250	250	2.30	115	14	116.7	12.0	120	1.50	150	500	250
极富	1000	2500	1250	1250	9.10	455	54	450	30.0	300	5.00	500	1000	500

Table 2. Reference, standard and normative values (2)

表 2. 参照值、标准值及规范值(2)

状态	透明度(m)		DO (mg/L)		初级生产力(g/m ² ·d)		NO ₃ ⁻ -N (mg/L)		NO ₂ -N (mg/L)		可溶解磷(mg/L)		TOC (总有机碳) (mg/L)	
	x_{ik}	s_{ik}	x_{ik}	s_{ik}	x_{ik}	s_{ik}	x_{ik}	s_{ik}	x_{ik}	s_{ik}	x_{ik}	s_{ik}	x_{ik}	s_{ik}
极贫	40	1	40	1	0.70	1	0.10	1	0.01	1	0.001	1	0.02	1
贫	8	5	16.5	5.88	1.18	4.79	0.50	5.0	0.05	5.0	0.005	5	0.10	5
中	2.40	16.68	10.0	16.0	2.0	23.32	3.0	30.0	0.15	15.0	0.010	10	0.50	25
富	0.73	54.8	4.0	100.0	3.25	100.08	10.0	100	0.50	50	0.050	50	1.50	75
重富	0.40	100	3.0	177.76	4.20	216	20.0	200	2.00	200	0.20	200	7.0	350
极富	0.10	400	1.0	1600	7.0	1000	35.0	350	5.00	500	1.00	1000	30	1500

如表 1 和表 2 所示, 不同指标的同级标准的“规范值” s_{ik} 差异均在 1 个数量级范围内。若对各指标的“规范值” s_{ik} 取自然对数 $\ln s_{ik}$, 则不同指标的同级标准的对数值差异更小, 相邻两级标准的对数值则近似成等差变化。因此可构造一个对 14 项指标皆适用的对数型幂函数计算“等效”营养状态的普适指数公式[18], 如式(3)所示。

$$V_i = \alpha (\ln s_{ik})^\beta \tag{3}$$

式中： s_{ik} 为指标*i*的“规范值”， α ， β 为指标参数， V 为指标*i*的幂函数营养状态指数。

参数 α ， β 与具体指标*i*无关而对所有14项指标皆适用，通过粒子群优化算法(PSO)确定为 $\alpha=10.77$ ， $\beta=1.1826$ [17][18]，则优化的对数型幂函数富营养化评价普适指数公式可表达为：

$$V_i = 10.77 (\ln s_{ik})^{1.1826} \tag{4}$$

则具有*k*项指标的营养状态综合指数计算公式为：

$$V_E = \sum_{i=1}^k W_i \times V_i = 10.77 \times \sum_{i=1}^k W_i \times (\ln s_{ik})^{1.1826} \tag{5}$$

式中： W_i 为指标*i*的归一化权重值，本研究将各指标视作等权重。

计算出营养状态综合指数 V_E 后即可对水体进行富营养化评价，其评价标准见表3。

Table 3. Evaluation criteria for eutrophication degree of water

表 3. 水体富营养化程度评价标准

营养程度	贫营养	中营养	富营养	重富营养	极富营养
分级标准	$V_E \leq 20$	$20 < V_E \leq 39.42$	$39.42 < V_E \leq 61.29$	$61.29 < V_E \leq 76.28$	$76.28 < V_E$

3. 富营养化评价与分析

3.1. 水质监测

基于监测河道的水系结构和现状资料，合理分布A、B、C三个监测点如图1所示，监测水体水质的时间和空间分布数据。水质检测包括采样器取样送实验室检测和在线仪器现场监测两种方式。将A、B、C三个监测点的水质参数进行取平均值处理，得到2019年8月1日~2020年8月1日为期一年的河道水质监测数据。

3.2. 富营养化评价

根据平原河网河道监测的水质指标，选取溶解氧(DO)、叶绿素a(Chl.a)、总磷(TP)、总氮(TN)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)七项指标作为富营养化评价的评价因子。2019年8月1日监测点水质指标数据如表4所示。

Table 4. Water quality monitoring index

表 4. 水质监测指标

采样日期	溶解氧 (DO) (mg/L)	叶绿素 a (Chl.a) (μg/L)	总磷 (TP) (ug/L)	总氮 (TN) (mg/L)	高锰酸盐指数 (COD _{Mn}) (mg/L)	氨氮 (NH ₃ -N) (mg/L)	硝酸盐氮 (NO ₃ ⁻ -N) (mg/L)
2019/8/1	4.30	7.79	456.11	2.91	9.89	0.46	1.12

参照表1和表2选取各项指标的极贫状态的 x_{i0} 作为参照值，再按式(1)和式(2)分别计算各指标的规范值，然后代入式(4)和式(5)计算出最终的营养状态综合指数 V_E 。

以2019年8月1日的水质监测指标为例，计算综合评价指数 V_E ，计算过程如下：

- 1) 根据表4中的实测水质数据 x_i 和表1和表2中的参照值 x_{i0} ，按式(1)和式(2)计算出规范值 s_i ；
- 2) 按式(4)计算各项指标的营养评价指数 V_i ，并确定权重 W_i ；
- 3) 按式(5)计算营养状态综合指数 V_E 。

计算结果详见表 5。

Table 5. Nutrient status composite index V_E calculation

表 5. 营养状态综合指数 V_E 计算

2019/8/1	溶解氧(mg/L)	叶绿素($\mu\text{g/L}$)	总磷($\mu\text{g/L}$)	总氮(mg/L)	高锰酸盐指数(mg/L)	氨氮(mg/L)	硝酸盐氮(mg/L)
参照值 x_{i0}	40	0.40	1.0	0.02	0.12	0.01	0.10
实测值 x_i	4.30	7.79	456.11	2.91	9.89	0.46	1.12
规范值 s_i	86.53	19.48	456.11	145.50	82.42	46.00	11.20
评价指数 V_i	63.12	39.01	91.80	71.91	62.31	52.69	30.57
权重 W_i	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7
综合评价指数 V_E	58.77						

采用同样的方法, 计算出 2019 年 8 月 1 日~2020 年 8 月 1 日一年监测期间的营养状态综合指数 V_E , 并进行富营养化评价, 评价结果如图 2 所示。

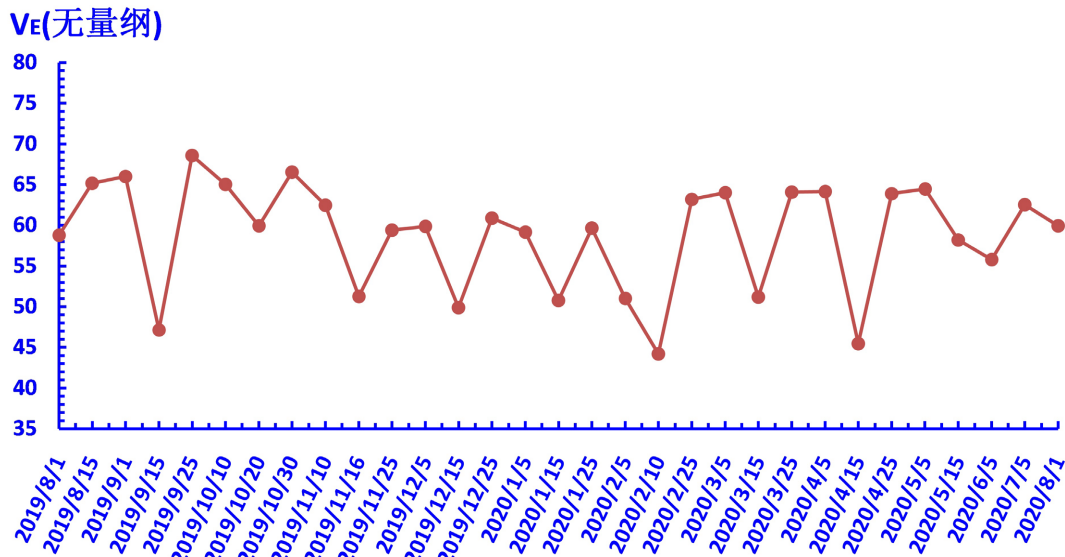


Figure 2. Diagram of year-round eutrophication evaluation

图 2. 全年富营养化评价图

3.3. 富营养化分析

由表 5 和图 2 对平原河网河道的富营养化状况进行分析可得:

1) 监测河道全年均处于富营养化 - 重富营养化状态, 富营养化状态占 58%, 重富营养化状态占 42%, 可见其水质情况不容乐观, 易导致藻类大量繁殖而发生水华现象, 并极大地影响其供水、观光旅游等功能。

2) 从图 2 监测日期对富营养化状况与季节的关系进行分析, 可以发现, 2019/11/16~2020/2/10 水体均处于富营养化状态, 其余时间则是以重富营养化状态为主, 说明水体的营养状况大致与季节有关, 即秋冬季的富营养化状况, 较春夏季要好, 这与不同季节的水温、光照强度、浊度、溶解氧等因素有关, 需要做进一步的研究。

3) 由表 5 可知, 氮和磷的含量对综合营养评价指数的贡献率最大, 说明氮和磷是水体富营养化的主要因素, 其中, 磷对平原河网水体富营养化的影响最大, 因此对于平原河网的富营养化控制, 关键在于控制水体中总磷的含量。

4) 总磷和总氮的控制需要从上游来水和河岸两侧的面源污染源两方面进行。一方面需要从上游引入水质较好的、氮磷含量低的源水进入河道,以控制水体的藻类繁殖,控制水质;另一方面,需要对两岸的农业排水进行排查和控制,减少化肥的排入量。

4. 结论

对数型幂函数普适指数公式适用于平原河网水体的富营养化评价,该评价方法计算简便且普适性高,各评价因子等效,评价结果具有可观性。

平原河网地区水体普遍处于富营养甚至重富营养状态,藻类大量繁殖易导致水质恶化。水体富营养状况与季节存在关联性。氮和磷是水体富营养化的主要影响因素,而磷的影响最大。需要控制污染源的氮和磷的排放以控制和改善水质。

参考文献

- [1] 尹玺. 平原河网地区分布式沟塘系统景观特征与水质变化关系研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2021.
YIN Xi. Study on the relationship between landscape characteristics of distributed ditch-pond system and water quality dynamics in plain river network area. Master's Thesis, Yangzhou: Yangzhou University, 2021. (in Chinese)
- [2] 刘洪财, 丁晓雯, 蒋咏, 等. 平原河网地区河流生态水量表征方式及核算研究——以通榆河为例[J]. 人民珠江, 2022, 43(8): 19-26.
LIU Hongcai, DING Xiaowen, JIANG Yong, et al. Characterization and calculation of ecological water quantity of rivers in plain river network areas—A case study of Tongyu River. Pearl River, 2022, 43(8): 19-26. (in Chinese)
- [3] COONLEY, D. J., PAERL, H. W., HOWARTH, W., et al. Ecology controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus. Science, 2009, 323(5917): 1014-1015. <https://doi.org/10.1126/science.1167755>
- [4] 裴玉. 平原河网多介质磷的分布特征及生物可利用性[D]: [硕士学位论文]. 烟台: 烟台大学, 2022.
PEI Yu. Distribution of phosphorus and its bioavailability in multi-phases of plain river network. Master's Thesis, Yantai: Yantai University, 2022. (in Chinese)
- [5] 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 等. 强降雨对平原河网入湖河道氮、磷影响[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 4970-4980.
LIAN Xinqiao, ZHU Guangwei, YANG Wenbin, et al. Effect of heavy rainfall on nitrogen and phosphorus concentrations in rivers at river-net plain. Environmental Science, 2020, 41(11): 4970-4980. (in Chinese)
- [6] QIN, B. Q., LI, W., ZHU, G. W., et al. Cyanobacterial bloom management through integrated monitoring and forecasting in large shallow eutrophic Lake Taihu (China). Journal of Hazardous Materials, 2015, 287: 356-363.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.01.047>
- [7] 杜赛, 汤佳良, 高何刚, 等. 绍兴三大水域富营养化状态与微囊藻毒素污染状况研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2018, 28(21): 2643-2645+2648.
DU Sai, TANG Jialiang, GAO Hegang, et al. Study on eutrophication state and microcystin pollution in three major waters in Shaoxing. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2018, 28(21): 2643-2645+2648. (in Chinese)
- [8] 李昊璋, 张民曦, 袁静, 等. 平原河网湖荡区域水环境容量分析: 以嘉兴北部地区为例[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 44-51.
LI Haozhang, ZHANG Minxi, YUAN Jing, et al. Assessment on water environmental capacity of coastal lowlands networked with rivers and lakes: A case study in the northern region of Jiaxing in China. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(1): 44-51. (in Chinese)
- [9] 朱金格, 刘鑫, 邓建才, 等. 太湖西部环湖河道污染物输移速率变化特征[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1509-1517.
ZHU Jinge, LIU Xin, DENG Jiancai, et al. Pollutant transport rates in the rivers around western Lake Taihu. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6): 1509-1517. (in Chinese)
- [10] XU, F. L., SHU, T. A GIS-based method of lake eutrophication assessment. Ecological Modelling, 2001, 144: 231-244.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(01\)00374-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00374-X)
- [11] 甄玉飞. 清水河水环境因子变化特征分析及富营养化评价[D]: [硕士学位论文]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2019.
ZHEN Yufei. Analysis of variation characteristics and eutrophication evaluation of water environmental factors in Qingshui River. Master's Thesis, Zhangjiakou: Hebei University of Architecture, 2019. (in Chinese)
- [12] 王芳. 岱海湖泊水质时空分布特征分析及富营养化评价[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
WANG Fang. Spatial and temporal distribution characteristics of water quality and eutrophication assessment in Daihai Lake. Master's Thesis, Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021. (in Chinese)

- [13] 欧阳虹, 王世强, 邱小琮, 等. 富营养化评价方法在宁夏清水河流域的适用性研究[J]. 水文, 2021, 41(6): 53-59.
OUYANG Hong, WANG Shiqiang, QIU Xiaocong, et al. Applicability research of eutrophication evaluation in the Qingshui River basin of Ningxia. *Journal of China Hydrology*, 2021, 41(6): 53-59. (in Chinese)
- [14] 赵玥, 景连东. 成都东湖水体富营养化研究[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2021, 47(1): 37-43.
ZHAO Yue, JING Liandong. Study on eutrophication of Donghu Lake in Chengdu. *Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition)*, 2021, 47(1): 37-43. (in Chinese)
- [15] 李楠鑫. 库湾水质时空动态变化规律及其关键驱动因子——以丹江口水库为例[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
LI Nanxin. The spatial and temporal dynamics of water quality and key driving factors in bays of Danjiangkou Reservoir. Ph.D. Thesis, Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [16] 刘静. 鄱阳湖水质参数遥感反演及富营养化评价[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2020.
LIU Jing. Remote sensing inversion and eutrophication evaluation of water quality parameters in Poyang Lake. Master's Thesis, Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [17] 李祚泳, 汪嘉杨, 郭淳. 富营养化评价的对数型幂函数普适指数公式[J]. 环境科学学报, 2010, 30(3): 664-672.
LI Zuoyong, WANG Jiayang and GUO Chun. A universal index formula for eutrophic evaluation using a logarithmic power function. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(3): 664-672. (in Chinese)
- [18] 马迎群, 曹伟, 赵艳民, 等. 典型平原河网区水体富营养化特征、成因分析及控制对策研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(2): 174-183.
MA Yingqun, CAO Wei, ZHAO Yanmin, et al. Eutrophication characteristics, cause analysis and control strategies in a typical plain river network region. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(2): 174-183. (in Chinese)