

# 基于湖泊水质和水环境容量评估的城市内湖污染治理研究

曾小宇<sup>1</sup>, 贺淑钰<sup>2</sup>, 陈俊辰<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>湖南艾布鲁环保科技股份有限公司, 湖南 长沙

<sup>2</sup>湖北大学资源环境学院, 湖北 武汉

Email: 492593622@qq.com, \*429016433@qq.com

收稿日期: 2021年7月16日; 录用日期: 2021年8月17日; 发布日期: 2021年8月24日

## 摘要

以快速城市化区域内湖为代表的水体普遍存在营养物超标现象, 从而导致水质退化、水体富营养化, 水体景观功能受到影响。治理城市内湖对于城市环境改善、形象提升具有重要的意义。本文以湖北省武汉市的城市内湖沙湖为研究案例, 通过对沙湖的资料收集, 补充调查, 结合当地环境统计数据, 1) 应用单因子评价模型评价沙湖的水质污染情况; 2) 基于湖泊富营养化评价模型评估沙湖富营养化状态; 3) 计算沙湖COD、TP、TN的水环境容量, 明确在水质目标下沙湖能够容纳污染物的总量, 为湖泊污染治理提供理论依据; 4) 从外源、内源、水体生态修复和水环境监管等方面提出沙湖水环境治理措施。

## 关键词

水质评价, 富营养化, 水环境容量, 污染防治, 城市内湖

# Research on Pollution Management of Municipal Lakes Based on Water Quality and Water Environment Capacity Assessment

Xiaoyu Zeng<sup>1</sup>, Shuyu He<sup>2</sup>, Junchen Chen<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Hunan Airbluer Environmental Protection Technology Co., Ltd., Changsha Hunan

<sup>2</sup>Faculty of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan Hubei

Email: 492593622@qq.com, \*429016433@qq.com

Received: Jul. 16<sup>th</sup>, 2021; accepted: Aug. 17<sup>th</sup>, 2021; published: Aug. 24<sup>th</sup>, 2021

\*通讯作者。

文章引用: 曾小宇, 贺淑钰, 陈俊辰. 基于湖泊水质和水环境容量评估的城市内湖污染治理研究[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(4): 806-813. DOI: 10.12677/aep.2021.114095

## Abstract

The water bodies represented by municipal lakes in rapidly urbanizing areas generally have nutrient overload, which leads to water quality degradation, water eutrophication, and water landscape functions are affected. The treatment of municipal city lakes is of great significance for urban environment improvement and image enhancement. In this paper, take the inner city lake Shahu in Wuhan, Hubei Province as a research case, through the data collection of Shahu, supplementary investigation, combined with local environmental statistics, 1) Applying a single factor evaluation model to evaluate the water quality pollution of Sand Lake; 2) Assessing the eutrophication status of Sand Lake based on the lake eutrophication evaluation model; 3) Calculating the water environment capacity of COD, TP and TN of Sand Lake, clarifying the total amount of pollutants that Sand Lake can accommodate under the water quality target, and providing a theoretical basis for lake pollution management; 4) We proposed measures for the management of the water environment of Sand Lake in terms of external edge pollutants, internal source pollutants, water ecology restoration and water environment supervision.

## Keywords

Water Quality Evaluation, Eutrophication, Water Environment Capacity, Pollution Prevention and Control, Municipal Lake

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

城市内湖是城市河湖水系的重要组成成分，具有防洪排涝、调节局地气候、改善生态环境等功能[1][2]。随着城市化程度的加快，人类活动强度日益加大，且城市内湖多呈相对封闭状态，水体缺乏流动性，水体富营养化、水质退化问题日益突出。水体富营养化导致藻类和其他水生植物过量繁殖，水体透明度下降，溶解氧含量降低，进而引起水生生物大量死亡、水质恶化、发腥发臭[3]，严重影响城市区域水域功能的发挥[4]。因此，分析城市内湖水体中氮、磷等污染物的变化特征、水体营养物状态以及水环境容量[5]，有助于揭示城市内湖水体污染成因和污染物总量控制[6]，为有效提出正确的水体富营养化控制措施提供科学依据，对改善城市居住环境和实现城市可持续发展具有重要价值[7]。

湖泊水环境评价方法较多，国内外常用的有单因子评价法、指数评价法、模糊数学评价法、人工神经网络法等。宁阳明等[8]利用单因子评价法、综合污染指数法和灰关联分析法对长江黄石段的水质进行评价，袁丽艳等[9]通过单因子评价法和加拿大水质标准法的配合运用为酒泉市饮用水水源地进行评价，有学者基于多属性决策原理建立了功效系数法对苏州内多个河流水质进行评价[10]。之前的研究方法已为城市内湖水环境现状评估与污染治理提供了良好的基础，但是，利用单因子评价法对城市内湖水环境进行分析，可以较为直观的反映水体的主要污染物；通过水环境容量法，可以明确研究城市内湖水体主要污染物的承载量。通过两种方法的配合运用，可以更加明确的为城市内湖的污染治理、水环境保护提供理论和实践依据。

为此，本文以武汉市内湖沙湖为研究对象，开展如下研究：1) 通过对沙湖基础资料的收集整理和2019.04~2020.01 环境监测数据的分析，评估沙湖水质变化特征。2) 应用富营养化评价模型评估沙湖富营养化状态，识别主要污染因子。3) 利用完全均匀混合箱体水质模型研究沙湖 COD、TN、TP 的水环境容

量,为污染物总量控制提供依据。4)通过对沙湖的水质污染现状和水环境容量的分析,提出沙湖污染防治的可行性对策。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 研究区域概况

沙湖位于武汉市武昌区中部区域,是武汉东沙湖水系的一部分[2],为武汉市区域内环线内唯一的湖泊,分为内沙湖和外沙湖,内沙湖面积 0.134 平方公里,外沙湖面积 3.197 平方公里,湖泊岸线长 9.8 公里,最高水位 19.65 米,内湖湖心最大水深 2.2 米,外湖水深 2 米左右。所在区域属亚热带季风气候,雨量充沛、日照充足、夏季酷热、冬季寒冷;夏季盛行东南季风,冬季盛行西北风,年均气温 15.8℃~17.5℃,年无霜期一般为 211~272 天,年日照总时数:1810~2100 小时[11]。湖泊周围区域均为城市用地,居民区、商务区、城市道路、高校分布其中。

### 2.2. 水质评价方法

本文采用单因子污染指数法评价沙湖水环境质量,因为沙湖水体有多种监测因子,并且影响每一个水体的主要污染因子均不同,使用该方法进行评价时,通常将评价的单个因子与评价标准进行比较,选出评价最差的因子,以此识别主要污染因子[12],有针对性的对水体进行治理,可以有效提高水体治理的效率和降低治理成本[13]。

计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中:  $S_i$  为第  $i$  种水质指标标准值(mg/L);  $C_i$  为第  $i$  种水质指标监测浓度(mg/L);  $P$  为单因子评价指数,当单因子指数评价模型污染指数  $P < 1$  时,说明该项水质指标参数达标,  $P > 1$  时,说明该项水质指标参数超标。并且  $P$  越大,水体该项水质指标污染越严重。

### 2.3. 水质富营养化评价模型

本文采用综合营养状态指数法评价沙湖水环境富营养化程度,根据沙湖的实际情况以及数据的可获得性,选择叶绿素 a、总氮、总磷、透明度、高锰酸盐指数作为沙湖富营养化评价指标。综合营养状态指数法[14]的模型为:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j) \quad (2)$$

式中:  $TLI(\Sigma)$  为综合营养状态指数;  $W_j$  表示第  $j$  种参数的营养状态指数的相关权重;  $TLI(j)$  表示第  $j$  种参数的营养状态指数。沙湖采用 0~100 的区间数字对湖泊营养状态进行分级:  $TLI(\Sigma) < 30$  为贫营养,  $30 \leq TLI(\Sigma) \leq 50$  为中营养,  $TLI(\Sigma) > 50$  为富营养,  $50 < TLI(\Sigma) \leq 60$  为轻度富营养,  $60 < TLI(\Sigma) \leq 70$  为中度富营养,  $TLI(\Sigma) > 70$  为重度富营养。

### 2.4. 水环境容量分析

#### 2.4.1. 水环境容量计算模型

根据《全国水环境容量核定技术指南》,对于中小湖泊(湖库面积小于 25 km<sup>2</sup>)的理想环境容量计算可以在湖泊完全混合衰减模式的基础上考虑特殊控制区之后,计算得到的理想水环境容量[15],沙湖作为武汉市中心的城内湖,其湖泊面积为 3.197 km<sup>2</sup>,并且其功能为人体非直接接触的娱乐用水区,不属于特殊控制区水体,所以沙湖的理想环境容量可以采用完全混合衰减模式进行计算。

完全均匀混合箱体水质模型是将水库视为一个完全混合反应器[16], 盒模型的基本方程为:

$$\frac{VdC}{dt} = QC_E - QC + S_c + \gamma(c)V \quad (3)$$

式中:  $V$  为湖泊中水的体积( $m^3$ );  $Q$  为平衡时流入与流出湖泊的流量( $m^3/a$ );  $C_E$  为流入湖泊的水量中水质组分浓度( $g/m^3$ );  $C$  为湖泊中水质组分浓度( $g/m^3$ );  $S_c$  为如非点源一类的外部源和汇( $m^3$ );  $\gamma$  为水质组分在湖泊中的反应速率。

上式为零维的水质组分的基本方程。如果反应器中只有反应过程, 则  $S_c = 0$ , 当所考虑的水质组分在反应器内的反应符合一级反应动力学, 而且是衰减反应时, 则  $\gamma(c) = -KC$ , 公式则变为一下形式:

$$\frac{VdC}{dt} = QCE - QC - KCV \quad (4)$$

$K$  是一级反应速率常数( $1/t$ )。当反应器处于稳定状态时,  $dC/dt = 0$ , 可得到下式:

$$QCE - QC - KCV = 0 \quad (5)$$

式中:  $t=V/Q$ ,  $t$  为停留时间。

采用完全混合衰减模式进行计算, 计算不考虑混合区, 则当  $C$  为水库功能区要求浓度标准  $C_s$  时, 则上式变为:

$$W_c = 31.54 * (QC_s + KC_s V / 86400) \quad (6)$$

其中:  $W_c$  为湖库水环境容量( $t/a$ );  $V$  为湖泊中水的体积( $m^3$ );  $Q$  为平衡时流入与流出湖泊的流量( $m^3/s$ );  $C_s$  为湖泊水功能区要求浓度值( $mg/L$ );  $K$  为级反应速率常数( $1/d$ )。

## 2.4.2. 水质标准及计算参数确定

根据国家《地表水环境质量标准》(GB3838-2002), 沙湖水体水质控制标准为IV类, 污染因子标准限值见表1。

Table 1. Pollutant control index standard limit value

表 1. 污染物控制指标标准限制

水质标准	COD (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
IV 类	30	1.5	0.1

根据湖北省区域相关经验系数, 本次容量测算湖衰减系数采用 COD 0.06/d, 总氮 0.04/d, 总磷 0.02/d。根据沙湖的水文条件, 所需沙湖水体基本计算参数如下表 2。

Table 2. Basic calculation parameters of Shahu Lake

表 2. 沙湖水体基本计算参数

序号	参数名称	单位	符号	数值
1	湖泊水的体积	$m^3$	$V$	1,540,032
2	平衡时流入与流出的流量	$m^3/a$	$Q$	7,884,000

## 3. 结果与分析

### 3.1. 沙湖水质变化时空特征

由表 3 可知, 沙湖水质在 2019.4~2020.1 期间均为 V 类以上水体, 其中在 2019 年 7~11 月达到了劣 V

类水体，主要超标的污染物为 TP，其中 2019 年 8 月为 TP 和 COD，其中 2019.9~2020.1 期间 COD 均为地表水 V 类水体。表明过度的 TP、有机污染物的排放对沙湖水质造成了严重的影响，根据沙湖的实际情况，与周围大量生活污水的排放入沙湖中，以及水中底泥磷的释放有很大的关联，所以后期对于沙湖的治理要着力解决 TP 这一污染因子对水体的污染。

**Table 3.** Spatiotemporal characteristics of water quality in Shahu Lake

**表 3.** 沙湖水质时空变化特征

时间	2019.4	2019.5	2019.6	2019.7	2019.8	2019.9	2019.10	2019.11	2019.12	2020.1
超标指标	TP	TP	TP	TP	TP/COD	TP	TP	TP	TP	TP
水质类别	V 类	V 类	V 类	劣 V 类	劣 V 类	劣 V 类	劣 V 类	劣 V 类	V 类	V 类

### 3.2. 沙湖富营养化状态

沙湖水体在 2019.4~2020.1 期间均为中度富营养以上程度，其中 2019 年 8 月水体营养程度达到了重度富营养，表明沙湖水质富营养化严重。(表 4)

**Table 4.** Eutrophication level of water in Shahu Lake from 2019.4 to 2020.1

**表 4.** 沙湖 2019.4~2020.1 水质富营养化情况

时间	2019.4	2019.5	2019.6	2019.7	2019.8	2019.9	2019.10	2019.11	2019.12	2020.1
富营养化尺度	中度富营养	中度富营养	中度富营养	中度富营养	重度富营养	中度富营养	中度富营养	中度富营养	中度富营养	中度富营养

### 3.3. 沙湖水环境容量

通过模型分析得到沙湖主要污染物 COD、TN、TP 的水环境容量见下表 5，依据沙湖水质控制目标地表水 IV 类标准，沙湖水体中的 COD、TN、TP 的水环境容量分别为 1248.47 t/a、45.56 t/a、2.09 t/a，其水环境容量大小与水质标准密切相关，通过合理计算水环境容量值，根据其水体中各污染物的水环境容量大小可以有效控制和消减入湖污染物质，使沙湖水质达到所规定的 IV 类水质要求。

**Table 5.** Main pollutants water environmental capacity in Shahu Lake

**表 5.** 沙湖主要污染物水环境容量

污染物	水环境容量(t/d)
COD	1248.47
TN	45.56
TP	2.09

## 4. 讨论

### 4.1. 沙湖水环境质量显著及污染成因分析

通过沙湖水质和富营养化程度分析可知，沙湖主要的超标因子为 TP 和 COD，并且当前沙湖处于富营养化状态。根据已有资料和实地调查分析，作为武汉市中心的内湖，沙湖的持续富营养化问题主要影响因素总结有以下几个方面：1) 沙湖处于武汉市武昌区的中心地带，湖泊沿线的工厂并不多，主要污水的来源为生活污水，并且随着人口的不断增长，城区人口更加聚集[17]，而周边污水处理厂且处理能力有限，导



致有生活污水直接排入沙湖中的现象，湖中总磷和 COD 长期处于超标的状态，这是沙湖水质富营养化的重要的外源因素。2) 沙湖水体的流通性差，水体的流动速度相对缓慢，水流滞留时间变得更长，导致水体自身交换缓慢，加之水中的像总磷等指标一直处于超标表示水中的氮磷等营养物质充足，为水中藻类的植物的生长创造了条件，加剧了沙湖水质富营养化的进程。3) 沙湖中存在大量的底泥，底泥中有大量的氮磷等营养物质的沉积，在一定的条件下，底泥的污染物向水体中释放导致氮磷等营养物质的增加，形成加速湖泊污染进程的内源性污染。这一系列的问题使的沙湖水长期处于 V 类水体，甚至达到劣 V 类水体。因此，根据沙湖的水质富营养化的成因后续应该采取相应治理措施，改变水质状况，降低水质的富营养化程度。

## 4.2. 沙湖水环境污染源治理

### 1) 外源性污染源控制措施

a) 对于排入沙湖水体的外源性污染源[18]，是沙湖水体中 COD、TP 等污染物的重要来源，为使入湖负荷在沙湖水体的承载能力范围内，应根据沙湖水质目标下的水环境容量结果 COD (1248.47 t/a)、TN (45.56 t/a)、TP (2.09 t/a)进行总量控制，对入湖负荷进行严格的消减措施。b) 对沙湖的生活污水排放口、暗渠和排水沟进行全面整治防止周边污水乱排、偷排对沙湖水体造成影响，杜绝以往出现的餐饮生活废水未经处理直排进入沙湖的这种不合理排污行为；其次随着人口数量和人们生活水平的提高，生活污染物和污水排放量也相应的增加，这无疑对城市污水管网提出了巨大的挑战，要加大城市管网建设；提高污水处理厂收集和處理生活污水的能力，将城区所产生的的生活污水处理达标排放，减轻污染物进入湖泊中量。c) 对于生活垃圾对于湖泊整体环境的影响，严禁直接将垃圾直接扔进湖中的行为，杜绝沙湖湖面上出现各种“漂浮物”；另外生活垃圾的随意堆放，大量的垃圾渗滤液在降雨等地表径流的作用下流入沙湖中，对沙湖水质造成影响；所以应该禁止将生活垃圾随意堆放，建立完备的城市生活垃圾管理体系。

### 2) 内源性污染源控制措施

在严格控制外源性污染的同时，控制底泥的污染也是重要关键因素，当沉积在底泥中的污染物质趋于饱和状态，底泥的纳污能力到一定量的时候，将会把污染物重新释放，形成内源性污染[19]，也是造成沙湖富营养化的重要因素，因此应清淤疏浚，对湖底底泥进行处理。

### 3) 水体生态修复措施

在控制外源和内源污染来源后，需对沙湖采取生态修复技术进行生态修复，实现浑水生态系统向清水草型生态系统的转变，恢复生物多样性[20]。可以采取管网排口的生态化改造，特别是沙湖周边都是建成区，雨污合流问题比较突出，采用排口的生态化改造[21]，能有效消减入湖污染负荷的同时，兼具有美化湖泊水面的景观。同时种植苦草、眼子菜等水生植物净化水体，构建以美人蕉、芦苇等挺水植物为主的环湖湿地[22]；投放鱼类、螺类等动物以重建河湖食物链，恢复河湖曾经被破坏的水生态系统[23]，让湖泊逐步恢复自净能力。

### 4) 水环境监督管理措施

沙湖作为公共的社会资源，应加大对制度实施的过程和结果进行强有力的监督，形成政府、公众和社会组织多方面的沟通合作、相互监督的局面。其次，大力宣传环保的科学知识，提高公众的环保意识，沙湖周围直接将生活污水排入湖中，生活垃圾随意丢弃入湖中的现象应该得到制止，大家共同参与，相互监督，共同守护沙湖水环境的健康发展。

## 5. 结论

沙湖位于武汉市内环的城市内湖，近年来受点源和内源等因素影响，大量污染物进入湖泊水体，导致沙湖水质污染严重，长期处于富营养化状态，严重影响了周围的居住环境和城市风貌。通过单因子水

质评价、富营养化模型评价和水环境容量分析, 沙湖水环境主要污染因子为 TP 和 COD, 总体处于富营养化程度, 在水质目标下其水环境容量分别是: COD 为 1248.47 t/a, TN 为 45.56 t/a, TP 为 2.09 t/a。针对长期以来存在的水质污染和水体富营养化问题, 在分析其成因的基础上, 应严格控制外源的生活污水排入湖泊水体, 采取清淤等治理措施防治内源污染物的释放, 同时加强生态修复措施, 建立长效的保护机制, 使沙湖水环境得到有效保护。

## 参考文献

- [1] 程庆霖, 何岩, 黄民生, 童敏. 城市黑臭河道治理方法的研究进展[J]. 上海化工, 2011, 36(2): 25-31.
- [2] 刘志文, 王一峰, 徐玲. 武汉城市湖泊演化及防治对策探讨[J]. 水利水电快报, 2021, 42(2): 36-39.
- [3] 高可伟, 朱元荣, 孙福红, 陈艳卿, 廖海清, 马蕙蕙, 胡晓燕. 我国典型湖泊及其入湖河流氮磷水质协同控制探讨[J]. 湖泊科学, 2021, 33(5). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1331.p.20210707.1452.012.html>
- [4] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊种蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 589-595.
- [5] Hu, K.M., Wang, Y.Y., Feng, B., Wu, D., Tong, Y.F. and Zhang, X.Q. (2020) Calculation of Water Environmental Capacity of Large Shallow Lakes: A Case Study of Taihu Lake. *Water Policy*, **22**, 223-236. <https://doi.org/10.2166/wp.2020.076>
- [6] Xie, R.R., Pang, Y. and Bao, K. (2014) Spatiotemporal Distribution of Water Environmental Capacity—A Case Study on the Areas of Taihu Lake in Jiangsu Province, China. *Environmental Science Pollution Research*, **21**, 5465-5473. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2088-9>
- [7] 李杰, 吴姝涵, 王冠平, 石伟, 王悦兴, 潘虹中. 城市河湖污染治理方法及应用前景[C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会科学技术年会论文集: 2019 年卷. 西安: 《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司, 2019: 1420-1424.
- [8] 宁阳明, 尹发能, 李香波. 基于综合污染指数法和灰关联分析法的长江黄石段水质评价[J]. 湖北师范大学学报(自然科学版), 2020, 40(3): 39-46.
- [9] 袁丽艳, 刘晓燕. 单因子评价法和加拿大水质指数法在水源地水质评价中的应用——以酒泉市“千吨万人”饮用水水源地为例[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(5): 48-51.
- [10] Luo, L.J. and Peng, X.H. (2016) A Novel Water Quality Evaluation Method Based on Efficacy Coefficient Method. *Chemical Engineering Transactions*, **51**, 55-60.
- [11] 代晓颖, 徐栋, 武俊梅, 丰俊, 邹书成, 尹珩. 2015~2019 年武汉市湖泊水质时空变化[J]. 湖泊科学, 2021, 33(5). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1331.p.20210707.1307.006.html>
- [12] 罗芳, 伍国荣, 王冲, 张琳. 内梅罗污染指数法和单因子评价法在水质评价中的应用[J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(5): 87-89.
- [13] 李慧明, 侯林雨, 徐鹏. 不同水质指数法在峡江水库水质评价中的应用[J]. 人民长江, 2020, 51(S2): 32-36, 87.
- [14] 王鹤扬. 综合营养状态指数法在陶然亭湖富营养化评价中的应用[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(9): 188-194.
- [15] 杨国录, 陆晶, 骆文广, 朱森林, 宋云浩. 水环境容量研究共识问题探讨[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 1-6.
- [16] 刘晓东, 杨婷, 石佳佳, 刘朗, 吴偲, 姜翠平. 关于现行水域纳污能力计算规程中河流计算模型的探讨[J]. 环境保护科学, 2018, 44(2): 32-36.
- [17] 梁玉婷, 杨星宇, 王朴, 康凯丽, 欧克芳, 汪婷. 武汉城区水体水质污染现状及影响因子分析[J]. 环境生态学, 2021, 3(2): 10-16.
- [18] Xu, Y.F., Ma, C.Z., Huo, S.L., Xi, B.D. and Qian, G.R. (2012) Performance Assessment of Water Quality Monitoring System and Identification of Pollution Source Using Pattern Recognition Techniques: A Case Study of Chaohu Lake, China. *Desalination and Water Treatment*, **47**, 182-197. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.696797>
- [19] Zheng, X.L., Liu, G.X., Yang, W., Peng, X.X., Liu, H.Z., Li, H. and Li, W. (2021) Dominant Contribution of a Lake's Internal Pollution to Eutrophication during Rapid Urbanization. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*.
- [20] 高光, 张运林, 邵克强. 浅水湖泊生态修复与草型生态系统重构实践——以太湖蠡湖为例[J]. 科学, 2021, 73(3): 9-12.
- [21] 陈璇, 黄超颖. 中心城区入湖排口的污染物消减实践——以武汉市南湖楚康陆排口为例[J]. 中国资源综合利用,

---

2020, 38(12): 128-130.

- [22] Zhang, Y.L., Liu, X.H., Qin, B.Q., Shi, K., Deng, J.M. and Qian, G.R. (2016) Aquatic Vegetation in Response to Increased Eutrophication and Degraded Light Climate in Eastern Lake Taihu: Implications for Lake Ecological Restoration. *Scientific Reports*, **6**, Article ID: 23867. <https://doi.org/10.1038/srep23867>
- [23] Qin, B.Q. (2013) A Large-Scale Biological Control Experiment to Improve Water Quality in Eutrophic Lake Taihu, China. *Lake and Reservoir Management*, **29**, 33-46. <https://doi.org/10.1080/10402381.2013.767867>