Journal of Water Resources Research 水资源研究, 2026, 15(4), 431-438
Published Online August 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/jwrr
https://doi.org/10.12677/jwrr.2026.154046

Hans汉斯

# 基于R软件在湖库营养化评价中的应用

徐恩奎[1]，白　杨[1]，熊万清[2]，王　岩[1]

[1]湖北省随州市水文水资源勘测局，湖北　随州
[2]湖北省黄冈市水文水资源勘测局，湖北　黄冈

收稿日期：2026年6月25日；录用日期：2026年8月16日；发布日期：2026年8月27日

## 摘　要

**湖北省素有“千湖之省”之称，湖库水生态对区域可持续发展至关重要。为科学评估其富营养化状况，本研究以湖北省33个典型湖库为对象，探讨基于R软件在湖库营养化评价中的应用。研究收集了湖库的水质监测数据(含总氮、总磷、叶绿素a等)，依据《地表水资源质量评价技术规程》(SL 395-2007)规定的指数法(EI)，运用R软件构建营养状态指数评价模型，开展多维数据处理与可视化分析。结果表明，33个典型湖库里有11个处于中营养状态，22个处于轻度富营养状态，中营养站点以水库型水体为主，轻度富营养站点以湖泊型水体为主。研究证实，R软件在营养化评价中具有计算高效、扩展性强和可视化直观等优势，可为湖北省湖库水环境精准治理、富营养化预警及生态保护提供科学依据与技术支撑。**

## 关键词

**R软件，湖库，富营养化评价，EI指数法**

# Application of R Software-Based Assessment of Eutrophication in Lakes and Reservoirs

**Enkui Xu[1], Yang Bai[1], Wanqing Xiong[2], Yan Wang[1]**

[1]Hubei Suizhou Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Suizhou Hubei
[2]Hubei Huanggang Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Huanggang Hubei

Received: June 25, 2026; accepted: August 16, 2026; published: August 27, 2026

## Abstract

**Hubei Province is renowned as the “Province of Thousand Lakes”, and the water ecology of lakes and reservoirs is vital to regional sustainable development. To scientifically assess their eutrophication status,**

作者简介：徐恩奎(1991-)，男，湖北省黄冈人，工程师，主要从事水资源监测评价及水环境评价的研究，Email: 1135045593@qq.com

文章引用：徐恩奎，白杨，熊万清，王岩．基于 R 软件在湖库营养化评价中的应用[J]．水资源研究, 2026, 15(4): 431-438.
DOI: 10.12677/jwrr.2026.154046

**this study selected 33 typical lakes and reservoirs in Hubei Province as research objects and explored the application of R software in eutrophication assessment. Water quality monitoring data (including total nitrogen, total phosphorus, chlorophyll-a, etc.) were collected. According to the index method (EI) specified in the Technical Regulations for Surface Water Resources Quality Assessment (SL 395-2007), R software was used to construct a trophic state index evaluation model and carry out multi-dimensional data processing and visualization analysis. The results showed that among the 33 typical lakes and reservoirs, 11 were in a mesotrophic state and 22 were in a mildly eutrophic state. The mesotrophic sites were mainly reservoirs, while the mildly eutrophic sites were mainly lakes. The study confirms that R software has advantages such as high computational efficiency, strong scalability, and intuitive visualization in eutrophication assessment, and can provide a scientific basis and technical support for precise water environment management, eutrophication early warning, and ecological protection of lakes and reservoirs in Hubei Province.**

## Keywords

**R Software, Lakes and Reservoirs, Eutrophication Assessment, EI Index Method**

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. 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

湖库富营养化已成为全球最严峻的水环境问题之一，其本质是氮、磷等营养盐过度富集，引发藻类异常增殖、溶解氧锐减及生态系统退化[1]。生态环境部历年公报显示，重点湖库富营养化比例长期居高不下，太湖、巢湖、滇池等大型湖泊水华事件频发，严重威胁饮用水安全与水生态健康[2]。

近年来，为满足供水、灌溉、发电等多元化需求，全球兴建了大量水库工程。水库蓄水将流动的河流转变为相对静止的深水水体，显著延长水力停留时间，使外源输入的氮、磷等营养盐在库区大量滞留，富营养化风险随之显著提升。这一现象并非区域特例，而是全球湖库面临的共性问题：中国三峡水库蓄水后，77.3%的入库支流库湾已达到富营养化水平，其中重富营养化占 45.5% [3]；千岛湖、丹江口水库等大型水源地同样面临富营养化威胁[4] [5]。国外亦不例外，美国米尔福德湖因连年暴发有害藻华被列为受损水体，非洲卡里巴水库建成后经历了严重的富营养化与水葫芦入侵，欧洲波兰图拉瓦水库、匈牙利帕特卡水库亦面临类似问题[6]-[9]。此外，水库运行中的水位周期性波动可能驱动干流高浓度营养盐水体向支流库湾逆向回流，进一步加剧局部富营养化与藻华暴发风险[10]。

在此背景下，科学、准确地评价湖库营养状态，识别其演化阶段与驱动因素，对水环境预警、生态修复及水资源管理至关重要。然而，目前国内湖库营养状态评价多依赖人工查表、Excel 逐项插值与逐站计算，存在流程碎片化、重复性差、易出错、难以批量处理与可视化表达等突出问题。随着“智慧水利”与“数字流域”建设的推进，湖库水质数据日益呈现标准化、开放化与多源融合趋势，面对高频次、多维度、大样本的现代水环境监测数据，亟需一种开源、可重复、可扩展的自动化评价方案。R 软件作为面向统计计算与图形分析的开源编程环境，具有数据处理能力强、扩展包丰富、脚本可复现等优势，为实现标准化、自动化湖库营养化评价提供了新的技术路径。

## 2. 湖库营养化评价方法概述

湖泊与水库中营养物质过量积累的现象被称为富营养化。从生态学角度而言，富营养化可定义为：农业生

态系统中化肥的过度施用或人类聚居点生活污水的排放，使大量营养物质随地表径流进入水体，引发浮游植物过度增殖，进而导致初级与次级生产力失衡，生态系统向更高演替阶段加速推进的综合效应。水体富营养化的本质是自养藻类大量繁殖的过程，藻类通过光合作用，利用光能和无机物质合成自身生物质，其总反应可表达为：

$$106CO_2 + 16NO_3^- + HPO_4^{2-} + 122H_2O + 18H^+ \rightarrow C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P\left(\text{藻类原生质}\right) + 138O_2$$

由该表达式可知，无机氮与无机磷是驱动藻类增殖的核心营养元素，其中磷通常被视为湖泊生产力的首要限制因子。因此，氮、磷浓度成为湖库营养化评价中最基本、最核心的参数。

目前，国内外已发展出多种湖库营养化评价方法。地域的不同，适用的评价方法也不同。在中国，地表水环境质量评价参数已扩展至 30 余项，并建立了五类水质分级体系，但富营养化的评价标准尚未实现统一。实践中常用的方法主要包括：综合营养状态指数法(TLI)、Carlson 营养状态指数法(TSI)、单因子评价法，以及水利行业标准《地表水资源质量评价技术规程》(SL 395-2007)所规定的指数法(EI 法) [11]-[14]。TLI 通常采用多参数加权综合，TSI 主要基于透明度、叶绿素 a 和总磷等参数，而 EI 法为中国水利行业标准推荐方法，采用单项参数插值赋分后算术平均得到 EI 指数。本研究采用 SL 395-2007 规定的 EI 指数法，基于 R 软件开展湖库营养化评价的方法构建与应用研究。

## 3. R 与 RStudio 简介

R 语言由 Ross Ihaka 和 Robert Gentleman 于 1995 年开发的，其设计思想源于贝尔实验室开发的 S 语言。作为一款专注于统计计算与数据可视化的编程环境，R 语言完全免费且代码开源，现已发展成为全球环境科学和生态学领域应用最为广泛的数据分析平台之一。R 语言之所以备受青睐，主要得益于其强大的统计建模能力、覆盖各研究方向的大量专业扩展包，以及基于脚本化操作的可重复研究模式。针对水环境研究领域，R 拥有多个成熟的扩展工具包，如 tidyverse (数据清洗与变换)，vegan (群落生态学与多元分析)，ggplot2 (数据图形可视化)，sf (矢量数据处理)，rLakeAnalyzer (湖泊物理分层与混合分析)。这些工具共同构成了从数据整理到结果输出的完整分析链条，为湖库营养化评价的系统实现奠定了技术基础。

RStudio 是基于 R 语言开发的集成开发环境，能够显著提升 R 开发的便捷性与工作效率，弥补 R 语言操作环境的局限。RStudio 是以 R 为基础的，所以在安装 RStudio 之前必须安装 R。

## 4. 基于 R 软件构建湖库营养化评价方法

安装 R 与 RStudio 后，即可开展基于 R 的湖库营养化评价方法构建。依据 SL 395-2007 规定的 EI 指数法，基于 R 软件构建湖库营养化评价的完整工作流，包括数据导入、数据预处理、EI 指数计算、营养状态分级判定及结果输出与可视化等环节，形成一套可重复、可追溯、可扩展的评价流程。

### 4.1. 数据导入

在传统的评价方法中多依赖 Excel，本研究以原始水质数据最常用的“.xls”或“.xlsx”存储格式为基础，将数据导入到 RStudio 中，主要用到 readxl 包的 read_excel()函数，将原始 Excel 水质数据命名为“x1.xls”，数据保存在“Sheet1”中，依据 SL 395-2007，导入后的数据框需包含监测站点及水质指标等核心字段。

### 4.2. 数据预处理

原始数据在导入后往往不能直接用于指数计算，需经过系统的预处理，预处理主要包括两个环节，数据类型转换和数据质量检查，水质指标在 Excel 中可能以文本格式存储，会被识别为字符串，或包含某些非数值描述。此类数据不能直接参与数值运算。本研究使用 dplyr 包中的 mutate()函数，配合 as.numeric()将水质指标各列

统一转换为数值型，无法识别的值，如包含“<”的文本，强制转为 NA，由后续插值函数中的 NA 处理逻辑统一处理。

### 4.3. 营养状态指数计算

营养状态指数计算是整个评价流程的核心环节，其工作主要是将各项水质指标的实测值进行赋分，再通过算术平均得到 EI 指数。每个评价参数规定了实测值与赋分值的对应关系，即插值节点。本研究以 list()函数定义各参数的插值标准，seq()函数定义赋分节点，interp_en ()函数定义插值封装逻辑。

### 4.4. 营养状态分级判定

在经过上述步骤后，获得 EI 指数后，对照 SL 395-2007 的分级标准采用 dplyr 包的 case when()函数分级判定各监测站点的营养状态等级。

### 4.5. 结果输出与可视化

RStudio 结果的输出有两种方式，一种是表格化输出，通过 Print()函数将最终结果数据框打印至控制台。另一种是利用 R 语言强大的图形功能对评价结果进行直观的可视化呈现，常用的图形如柱状图、饼图、相关性矩阵图等，可视化结果可导出为图片格式。

## 5. 应用实例分析

### 5.1. 研究数据来源与区域概况

本研究选取 2025 年度湖北省 33 个典型湖库(10 个水库和 23 个湖泊)作为评价对象，数据来源于湖北省水环境监测中心的实测资料。湖北省素有“千湖之省”之称，湖库资源丰富，其生态系统在水资源调蓄、生物多样性维持及区域气候调节中发挥着不可替代的作用。然而，近年来受农业面源污染、城市化进程及气候变化的共同影响，洪湖、梁子湖、长湖、斧头湖等典型湖泊正面临不同程度的富营养化威胁，表现为氮磷负荷偏高、透明度下降及藻类水华频发等问题。

监测数据由湖北省水环境监测中心按国家地表水环境监测技术规范统一采集，涵盖总磷、总氮、透明度、叶绿素 a 和高锰酸盐指数共 5 项指标，覆盖 SL 395-2007 规定的评价参数体系。原始数据以“.xls”格式存储，经整理后用于 R 软件的导入与评价分析，如表 1 所示。

**表 1.** 湖北省 33 个典型湖库实测数据

| 湖库名称 | TP (mg/L) | TN (mg/L) | SD (m) | Chl_a (μg/L) | CODMn (mg/L) |
|---|---|---|---|---|---|
| 保安湖 | 0.057 | 0.505 | 0.37 | 45.48 | 4.37 |
| 沉湖 | 0.068 | 0.932 | 0.43 | 1.78 | 5.63 |
| 磁湖 | 0.082 | 0.960 | 0.49 | 55.15 | 4.73 |
| 大冶湖 | 0.073 | 1.594 | 0.56 | 39.23 | 4.09 |
| 汈汊湖 | 0.017 | 1.280 | 0.35 | 11.50 | 4.45 |
| 东湖 | 0.074 | 0.767 | 0.59 | 5.87 | 4.77 |
| 斧头湖 | 0.083 | 1.518 | 0.70 | 11.31 | 5.03 |
| 洪湖 | 0.056 | 0.942 | 0.22 | 21.40 | 4.70 |
| 后官湖 | 0.055 | 0.651 | 0.87 | 10.83 | 5.15 |
| 后湖 | 0.112 | 1.544 | 0.63 | 11.90 | 5.97 |

续表

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 黄盖湖 | 0.105 | 1.615 | 0.75 | 31.35 | 5.53 |
| 梁子湖 | 0.039 | 0.617 | 0.64 | 7.02 | 3.83 |
| 鲁湖 | 0.083 | 0.811 | 0.60 | 5.95 | 4.97 |
| 墨水湖 | 0.165 | 1.948 | 0.48 | 27.79 | 7.25 |
| 南湖 | 0.225 | 1.416 | 0.33 | 6.44 | 6.37 |
| 三山湖 | 0.047 | 0.867 | 0.53 | 56.57 | 5.78 |
| 沙湖 | 0.048 | 0.670 | 0.56 | 6.78 | 5.35 |
| 汤逊湖 | 0.233 | 1.118 | 0.58 | 15.44 | 6.37 |
| 网湖 | 0.097 | 0.658 | 0.52 | 49.24 | 3.80 |
| 武山湖 | 0.095 | 1.022 | 0.48 | 4.28 | 5.72 |
| 西凉湖 | 0.053 | 1.532 | 0.63 | 20.87 | 5.03 |
| 长湖 | 0.048 | 0.817 | 0.44 | 26.11 | 3.74 |
| 涨渡湖 | 0.077 | 0.915 | 0.40 | 7.78 | 5.35 |
| 飞沙河水库 | 0.013 | 0.775 | 2.958 | 0.002 | 3.442 |
| 许家冲水库 | 0.028 | 1.068 | 2.108 | 0.005 | 3.658 |
| 朝阳寺水库 | 0.014 | 1.79 | 1.108 | 0.006 | 1.592 |
| 淹水水库 | 0.027 | 0.967 | 1.745 | 0.006 | 2.075 |
| 丹江口水库 | 0.048 | 1.026 | 2.702 | 0.011 | 1.933 |
| 黄龙滩水库 | 0.032 | 0.846 | 3.767 | 0.01 | 1.958 |
| 马家河水库 | 0.028 | 1.561 | 2.242 | 0.013 | 3.717 |
| 潘口水库 | 0.024 | 0.62 | 1.858 | 0.014 | 1.992 |
| 土门水库 | 0.033 | 2.26 | 1.535 | 0.015 | 2.298 |
| 北郊水库 | 0.024 | 0.818 | 1.133 | 0.007 | 3.833 |

## 5.2. 评价过程

依据 SL 395-2007 规定的 EI 指数法，本研究在 R 环境中构建了标准化评价流程，主要包括数据导入、数据预处理、插值赋分、EI 指数计算、营养状态分级及可视化等步骤。核心函数包括 read_excel()读取数据、mutate()与 as.numeric()进行类型转换、approx()实现插值赋分、rowMeans()计算综合赋分、case_when()完成等级判定。

完整运行代码，得到各监测站点 5 项指标的单项赋分、EI 指数、营养状态分级，如图 1 所示，相关性矩阵图如图 2 所示。

## 5.3. 结果分析

基于 R 软件对 2025 年度湖北省 33 个典型湖库的营养状态进行批量评价，整个计算流程从原始数据导入到结果及可视化输出仅需一次脚本运行即可完成。33 个站点、5 项指标的数据量计算，传统 Excel 手工处理需逐站逐项查表插值、逐行求和平均、逐条判定等级，完整处理一轮至少需数小时且极易出错；而在 R 中，完整流程可在数秒内执行完毕，且结果可一键复现，充分体现了 R 软件在批量化数据处理与自动化评价中的高效性。

评价结果表明，33 个站点的 EI 指数介于 39.28~63.41 之间，均值为 53.17。其中 11 各站点处于中营养状态，22 个站点处于轻度富营养状态，且中营养状态的站点多以水库型水体为主，轻度富营养状态以湖泊型水体为主。各单项指标赋分均值中，TN_En (59.81)最高，SD_En (55.20)次之，TP_En (50.82)、Chl_a_En (51.05)、CODMn_En (49.78)相对接近，表明氮营养盐负荷偏高与水体透明度下降是驱动湖北省湖库富营养化的主要因素。从空间分布来看，33 个湖库的 EI 值标准差约为 5.5，整体差异不大。各指标赋分相关性分析表明，TP_En 与 CODMn_En

| | 站点 | CODMn_En | TP_En | TN_En | SD_En | Chl_a_En | EI指数 | 营养状态分级 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 保安湖 | 50.91 | 51.33 | 50.10 | 73.00 | 65.12 | 58.09 | 轻度富营养 |
| 2 | 沉湖 | 54.08 | 53.66 | 58.63 | 66.66 | 27.77 | 52.16 | 轻度富营养 |
| 3 | 磁湖 | 51.83 | 56.33 | 59.20 | 60.66 | 67.67 | 59.14 | 轻度富营养 |
| 4 | 大冶湖 | 50.22 | 54.50 | 65.94 | 58.88 | 63.48 | 58.60 | 轻度富营养 |
| 5 | 汈汊湖 | 51.12 | 34.44 | 62.80 | 75.33 | 50.93 | 54.92 | 轻度富营养 |
| 6 | 东湖 | 51.93 | 54.73 | 55.34 | 58.13 | 43.12 | 52.65 | 轻度富营养 |
| 7 | 斧头湖 | 52.58 | 56.66 | 65.18 | 56.00 | 50.81 | 56.24 | 轻度富营养 |
| 8 | 洪湖 | 51.75 | 51.20 | 58.83 | 87.76 | 57.12 | 61.33 | 轻度富营养 |
| 9 | 后官湖 | 52.87 | 51.00 | 53.01 | 52.66 | 50.51 | 52.01 | 轻度富营养 |
| 10 | 后湖 | 54.91 | 61.16 | 65.44 | 57.50 | 51.18 | 58.04 | 轻度富营养 |
| 11 | 黄盖湖 | 53.83 | 60.50 | 66.15 | 55.00 | 61.40 | 59.37 | 轻度富营养 |
| 12 | 梁子湖 | 49.12 | 45.53 | 52.34 | 57.23 | 45.03 | 49.85 | 中营养 |
| 13 | 鲁湖 | 52.41 | 56.66 | 56.21 | 58.00 | 43.24 | 53.30 | 轻度富营养 |
| 14 | 墨水湖 | 58.12 | 66.50 | 69.47 | 62.50 | 60.47 | 63.41 | 轻度富营养 |
| 15 | 南湖 | 55.91 | 70.62 | 64.15 | 76.66 | 44.06 | 62.28 | 轻度富营养 |
| 16 | 三山湖 | 54.45 | 48.66 | 57.33 | 59.43 | 68.04 | 57.58 | 轻度富营养 |
| 17 | 沙湖 | 53.37 | 49.33 | 53.40 | 58.83 | 44.62 | 51.91 | 轻度富营养 |
| 18 | 汤逊湖 | 55.91 | 70.83 | 61.17 | 58.50 | 53.40 | 59.96 | 轻度富营养 |
| 19 | 网湖 | 49.00 | 59.33 | 53.16 | 59.63 | 66.11 | 57.44 | 轻度富营养 |
| 20 | 武山湖 | 54.29 | 59.00 | 60.21 | 61.66 | 40.46 | 55.12 | 轻度富营养 |
| 21 | 西凉湖 | 52.58 | 50.66 | 65.31 | 57.33 | 56.79 | 56.53 | 轻度富营养 |
| 22 | 长湖 | 48.72 | 49.11 | 56.33 | 65.66 | 60.02 | 55.97 | 轻度富营养 |
| 23 | 涨渡湖 | 53.37 | 55.33 | 58.30 | 70.00 | 46.29 | 56.66 | 轻度富营养 |
| 24 | 飞沙河水库 | 47.20 | 32.22 | 55.50 | 30.27 | 31.19 | 39.28 | 中营养 |
| 25 | 许家冲水库 | 48.29 | 41.16 | 60.67 | 35.94 | 41.85 | 45.58 | 中营养 |
| 26 | 朝阳寺水库 | 35.91 | 32.77 | 67.90 | 47.83 | 42.76 | 45.43 | 中营养 |
| 27 | 淹水水库 | 40.37 | 40.83 | 59.33 | 38.36 | 43.16 | 44.41 | 中营养 |
| 28 | 丹江口水库 | 39.32 | 49.23 | 60.25 | 31.98 | 50.59 | 46.27 | 中营养 |
| 29 | 黄龙滩水库 | 39.58 | 42.76 | 56.92 | 26.16 | 49.43 | 42.97 | 中营养 |
| 30 | 马家河水库 | 48.58 | 41.33 | 65.61 | 35.05 | 51.91 | 48.49 | 中营养 |
| 31 | 潘口水库 | 39.91 | 39.55 | 52.39 | 37.61 | 52.65 | 44.42 | 中营养 |
| 32 | 土门水库 | 41.48 | 43.33 | 70.65 | 39.76 | 53.30 | 49.70 | 中营养 |
| 33 | 北郊水库 | 49.16 | 39.44 | 56.36 | 47.33 | 44.99 | 47.46 | 中营养 |

**图 1.** 湖北省重要湖库富营养化 EI 评价结果

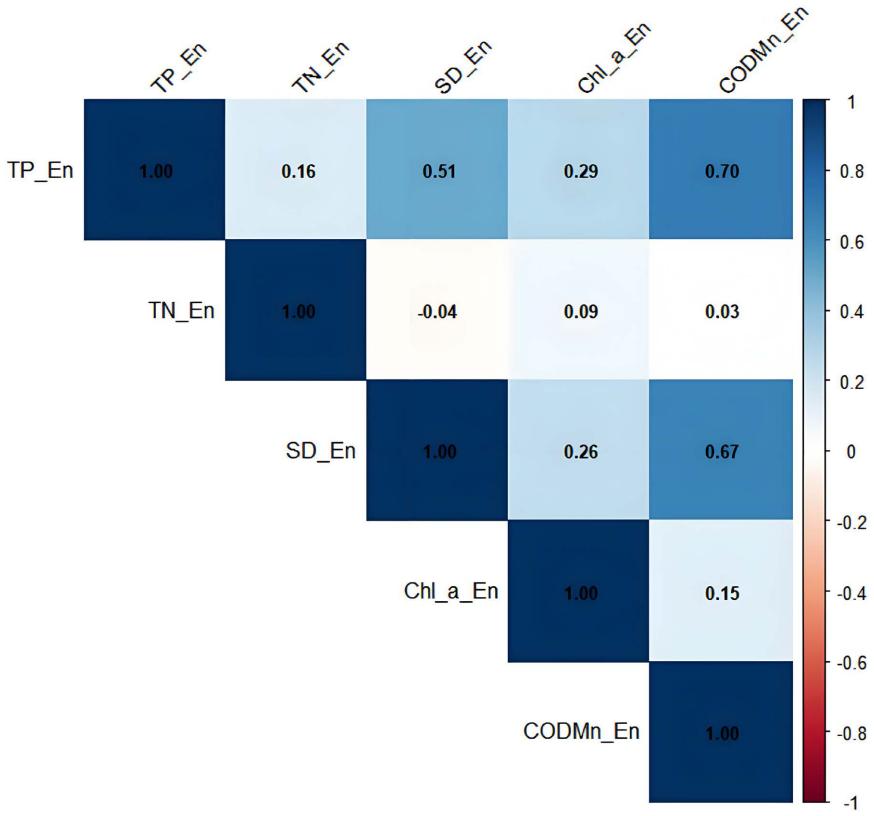



**图 2.** 相关性矩阵图

呈强正相关(r = 0.70)，TP_En 与 SD_En (r = 0.51)、SD_En 与 CODMn_En (r = 0.67)呈中度正相关，说明总磷、高锰酸钾指数与透明度变化具有同源性，所以该区域湖库富营养化治理应实施“控磷与控氮并重、分区施策”的策略，重点关注城市内湖的氮磷负荷削减与透明度改善，同时加强水库型水体的生态保护。

## 6. 结语

本研究基于 R 软件构建了湖库营养化评价的标准化工作流程，并以 2025 年度湖北省 33 个典型湖库的实测数据进行了实证应用。结果表明，该评价流程操作简便、运行高效，在批量数据处理与自动化评价方面具有良好的适用性。尤为重要的是，该工作流以脚本化编程为核心，当监测数据更新或评价标准调整时，仅需替换原始数据文件或修改脚本中的参数定义，即可快速适配新的评价需求，无需重新搭建分析框架，充分体现了 R 软件在湖库营养化评价中的可扩展性与可重复性。

尽管本研究验证了基于 R 软件的湖库营养化评价方法的可行性，但仍存在以下局限：一是样本虽包含 33 个典型湖库，但未涵盖湖北省全部湖库，结论尚不能完全代表全省湖库总体状况；二是仅使用 2025 年度数据，缺乏年际与季节对比，难以反映营养状态的动态变化；三是评价仅基于 EI 指数法，未与 TLI、TSI 等其他方法进行结果比对，方法差异尚需进一步验证。未来可扩大样本类型与时间尺度，并开展多方法比较研究，以提升评价结果的代表性与适用性。

## 参考文献

[1] 曹晓峰, 吉泽华, 兰华春, 等. 气候变化背景下我国湖库型水源富营养化控制与饮用水安全保障策略[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 34-40.

[2] 生态环境部. 2024 中国生态环境状况公报[R]. 北京: 生态环境部, 2025.

[3] 蔡庆华. 三峡水库富营养化问题与对策研究[J]. 水生生物学报, 2006, 30(1): 7-11.

[4] 许海, 连纲, 吴志旭, 等. 千岛湖水域生态系统研究进展: 基于野外站长期观测、研究与示范[J]. 湖泊科学, 2026, 38(2): 1-19.

[5] 柳根, 倪雪峰, 张成玉, 等. 2015-2024 年丹江口水库库湾水质及营养状态时空特征[J]. 湖泊科学, 2026, 38(4): 1478-1490, I0011, I0012.

[6] U.S. Geological Survey. Water-quality constituent concentrations and loads computed using real-time water-quality data for the Republican River, Clay Center, Kansas, August 2018 through July 2023. Scientific investigations report 2024-5072, 2024.

[7] MHLANGA, L. Kariba reservoir: Experience and lessons learned. Lakes & Reservoirs: Research and Management, 2006, 11(4): 191-206.

[8] BUTA, B., WIATKOWSKI, M., GRUSS, Ł., et al. Spatio-temporal evolution of eutrophication and water quality in the Turawa dam reservoir, Poland. Scientific Reports, 2023, 13: 9880. https://doi.org/10.1038/s41598-023-36936-1

[9] TOMBOR, E., KORPONAI, J. L., ZSIGMOND, A. R., et al. Response of a shallow water reservoir to anthropogenic stressors: Implications for the water supply of Lake Velence, a major recreational lake in Hungary. Hydrobiologia, 2026, 853(9): 2769-2794.

[10] 郎韵, 王玲玲, 韩丽娟, 等. 三峡水库水位波动对香溪河库湾温差异重流的影响[J]. 湖泊科学, 2025, 37(6): 1-15.

[11] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 2002, 18(5): 47-49.

[12] CARLSON, R. E. A trophic state index for lakes. Limnology and Oceanography, 1977, 22(2): 361-369. https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361

[13] 翟壮, 张同亮, 蔡文倩, 等. 祖厉河流域水质评价与时空变化分析[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(7): 992-998+1006.

[14] 中华人民共和国水利部. SL 395-2007 地表水资源质量评价技术规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.